

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

По мере приближения срока ввода в действие стандарта IMO Tier 3, все большую остроту приобретают дискуссии по поводу средств снижения соответствующих целевых показателей по снижению выбросов NO_x.

Известные промышленно освоенные технологии снижения выбросов NO_x такие как SCR-NH₃ и EGR обладают рядом серьезных недостатков. Поэтому все большее внимание привлекают альтернативные технологии.

В докладе, перевод которого предлагается вниманию наших читателей, обсуждается возможность использования специальных полимерных мембран с селективной проницаемостью для изменения состава воздуха, поступающего в цилиндры. Уменьшение концентрации кислорода в воздухе ведет к снижению выбросов NO_x.

Наиболее эффективно одновременное снижение концентрации кислорода и увлажнение воздуха на впуске. Мембранные технологии позволяют реализовать эти процессы как совместно (в одном агрегате), так и порознь.

Второй из публикуемых в этом номере докладов посвящен развитию одной из традиционных технологий — снижению выбросов NO_x за счет применения экстремального цикла Миллера. Показано, что требования IMO Tier 3 могут быть выполнены при следующих условиях:

- наличие двухступенчатого турбонаддува;
- наличие регулируемой системы импульсного впрыска топлива высокого давления;
- использование водотопливной эмульсии.

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

СНИЖЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ NO_x В ОТРАБОТАВШИХ ГАЗАХ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ НА 80 % С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНОЙ МЕМБРАНЫ

*Kazuyuki Maeda, Dai Yamanishi,
National Fisheries University, Япония
Akihiko AZETSU, Tokai University, Япония
Hirokazu Ohno, Atsushi Shimizu,
Tomohiro Niihama, Masahiro Tsukamoto,
Asahi Kasei Chemicals Corporation, Япония*

Реферат

Согласно правилам IMO Tier 3, к 2016 г* выбросы NO_x от судов, находящихся в зонах контролируемых выбросов (ЕСА), должны быть снижены более чем на 80 % относительно уровня, предусмотренного IMO Tier I. Это может быть достигнуто за счет таких технологий, как каталитическое восстановление (SCR), увлажнение заряда (например, путем эмульсификации топлива), а также рециркуляция отработавших газов (EGR). В последнее время большое внимание уделяется развитию технологий на основе полимерной мембраны с увлажнением и обогащением азотом (Nitrogen-enrichment Humidification Membrane — NHM), разработанные фирмой «Asahi Kasei Chemicals Corporation» (Япония). Эта технология обеспечивает снижение выбросов NO_x за счет уменьшения концентрации кислорода во впускном воздухе с помощью специальной мембраны при одновременном его увлажнении. Поскольку данное устройство устанавливается на стороне всасывания, на него не влияют ограничения по

содержанию серы в топливе, и оно не подвержено влиянию тенденций, связанных с изменением состава и источников поступления судового топлива в будущем. Система является абсолютно безопасной в экологическом отношении, так как использует для своей работы только воздух и воду. В рамках настоящей темы был проведен ряд экспериментов по снижению содержания NO_x в отработавших газах судовых дизелей. На первом этапе была создана экспериментальная «бомба» высокого давления с двумя смотровыми окнами, предназначенная для изучения характеристик впрыска и сгорания топлива в условиях низкого содержания кислорода в воздухе, высоких температур и давлений. На втором этапе система NHM подключалась к всасывающим трактам высокооборотного судового дизеля и малооборотного двухтактного одноцилиндрового отсека с целью изучения влияния концентрации кислорода и влаги в воздушном заряде на выбросы NO_x. Полимерная мембрана системы NHM обладает селективной проницаемостью в отношении кислорода и водяного пара. Система NHM состоит из двух компонентов — «системы снижения концентрации кислорода» и «системы увлажнения», с помощью которых можно легко регулировать обе указанные величины. Были выполнены следующие эксперименты:

- Визуализация сгорания: в экспериментальной «бомбе» с двумя смотровыми окнами с помощью высокоскоростной цветной видеокамеры через одно из окон производилась съемка протекающих процессов.

* Дата введения IMO Tier 3 только для Североамериканской зоны ЕСА.

➤ Исследование влияния концентрации кислорода: влажность воздуха на всасывании была доведена до 0 % с помощью осушителя. Затем концентрация кислорода в воздухе на всасывании была снижена с 21 до 16,2 % с помощью «системы снижения концентрации кислорода».

➤ Исследование влияния влагосодержания: влагосодержание воздуха на всасывании увеличивалось с 0 до 16 % с помощью «системы увлажнения».

➤ Исследование совместного влияния концентрации кислорода и влагосодержания в воздухе на всасывании: концентрация кислорода последовательно задавалась на уровне 21, 20, 19 и 18 %, после чего влагосодержание соответственно увеличивалось для каждого заданного значения концентрации кислорода.

Как показали результаты экспериментов, требования стандартов IMO могут быть выполнены при следующих условиях.

➤ При снижении концентрации кислорода температура пламени уменьшается в основном за счет эффекта разбавления продуктов сгорания, а также за счет роста концентрации CO₂, вызванного усилением тепловыделения. В результате выбросы NO_x снижаются.

➤ Уменьшение выбросов NO_x при снижении концентрации кислорода имело место при любой нагрузке. При этом для достижения требований стандарта IMO Tier 3 достаточно задать уставку по содержанию кислорода на уровне менее 17 %.

➤ Эффект снижения выбросов NO_x за счет снижения концентрации кислорода при одновременном увеличении влагосодержания усиливается, поэтому требования стандарта IMO Tier 3 можно выполнить, задав уставку по содержанию влаги во всасываемом воздухе на уровне более 16 mol. %.

ВВЕДЕНИЕ

Чтобы обеспечить выполнение требований стандартов IMO, производителям судовых двигателей пришлось разработать целый ряд технологий [1–8]. Наиболее эффективными, с точки зрения сокращения выбросов NO_x, оказались следующие решения: селективное каталитическое восстановление (SCR); рециркуляция отработавших газов (EGR); увлажнение рабочей смеси.

Селективное каталитическое восстановление NO_x осуществляется в реакциях с аммиаком или мочевиной, применяемых в качестве восстановителей. Хотя данная технология уже используется в наземных установках, ее применение на судах сталкивается с рядом проблем, а именно: малая эффективность при низких температурах отработавших газов, ущерб, наносимый окружающей среде из-за возможных утечек аммиака, а также высокие эксплуатационные расходы.

В процессе EGR концентрации кислорода на впуске снижается за счет добавления части отработавших газов в поток свежего воздуха, при этом удельная теплоемкость заряда увеличивается в результате возврата части продуктов сгорания (CO₂ и H₂O) во всасывающий тракт перед турбокомпрессором. Однако отработавшие газы перед поступлением в турбокомпрессор нуждаются в очистке от сернистых соединений, которые могут стать причиной низкотемпературной коррозии, а также от частиц сажи (PM). Кроме того, температуру отработавших газов необходимо снизить. Все это приводит к необходимости обеспечить в машинном отделении значительное пространство над двигателем для размещения системы очистки отработавших газов перед турбокомпрессором.

В последнее время получила развитие технология на основе полимерной мембраны, снижающей содержание кислорода (oxygen reduction membrane — ORM), разработанная фирмой «Asahi Kasei Chemicals Corporation» (Япония). Эта технология с помощью специальной мембраны одновременно уменьшает концентрацию кислорода и увеличивает влагосодержание во всасываемом воздухе, что приводит к снижению NO_x. Поскольку мембрана находится на стороне всасывания, качество топлива (в частности, содержание в нем серы) на работу системы не влияет. К тому же рассматриваемая система, использующая только воду и воздух, экологически безопасна.

В рамках настоящей работы в начале были изучены характеристики впрыска/сгорания дизельного топлива при очень низкой концентрации кислорода в экспериментальной «бомбе» со смотровыми окнами [9].

Цель этих экспериментов — выявить влияние концентрации кислорода на температуру пламени и кинетику образования NO_x при одновременном снижении концентрации кислорода и увеличении содержания влаги в воздухе на всасывании.

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДА НА ТЕМПЕРАТУРУ ПЛАМЕНИ

Оборудование и методика эксперимента

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Установка состоит из «бомбы» постоянного объема, системы впрыска топлива с электронным управлением и нескольких оптических систем, используемых для наблюдения за процессом. Внутренняя полость «бомбы» имеет форму цилиндра диаметром 80 мм с двумя кварцевыми смотровыми окнами размером 80 мм. Система впрыска топлива установлена на верхнем торце цилиндра и ориентирована так, чтобы факел топлива был направлен сверху вниз.

Для впрыска использовался гидравлический аккумулятор с электронным управлением [10]. Высокие значения температуры и давления со-

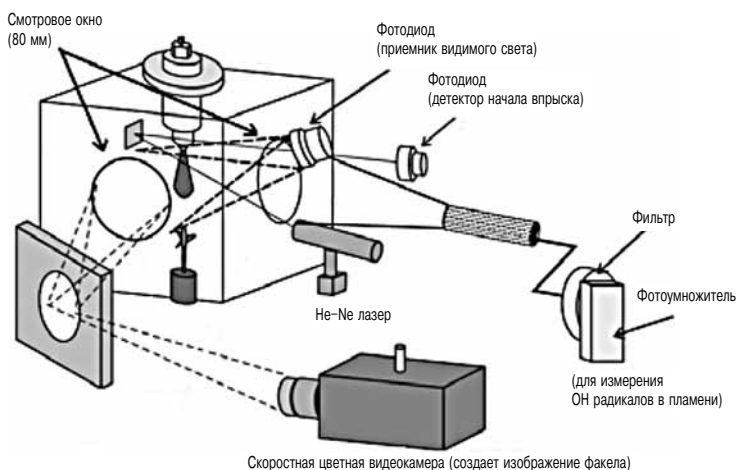


Рис. 1. Экспериментальная установка

Таблица 1

Условия эксперимента

Давление впрыска, МПа	100
Давление в «бомбе», МПа	3,0
Температура в «бомбе», К	985
Диаметр отверстий, мм	0,18
Масса впрыснутого топлива, мг	15
Концентрация O ₂ , %	8–21
Концентрация CO ₂ , %	0–15
Топливо	JIS#2 Diesel

здавались с помощью сжигания водорода в воздухе, обогащенном кислородом. Состав смеси подбирался таким образом, чтобы обеспечить заранее определенный уровень концентрации кислорода после сгорания водорода. После сгорания водорода впрыск топлива осуществлялся в момент, когда давление достигало требуемой величины, а процесс сгорания топлива фиксировался на высокоскоростную цветную камеру.

Для оценки двумерного (2D) распределения температур в факеле использовался двухцветный метод [11]. Этот метод основан на использовании соотношения между интенсивностью светового потока от светящегося пламени в двух областях спектра. Одновременно с температурой сажи регистрировался коэффициент KL, который является мерой количества сажи. Калибровка системы производилась с помощью вольфрамовой лампы.

Параметры впрыска топлива и условия его сгорания представлены в табл. 1. Давление впрыска было постоянно и составляло 100 МПа.

Впрыск представлен ступенчатой функцией, воспроизводящей типичный процесс впрыска в системе common rail.

Влияние концентрации кислорода на температуру пламени

На рис. 2 показаны 2D-распределения температур, зарегистрированные двухцветной термометрической системой. Изображения, полученные при концентрации кислорода 10, 12, 16 и 21 % сравнивались между собой при значениях концентрации CO₂ в сосуде, равных 0 и 15 %. Показанные на рис. 2 изображения получены в тот момент, когда площадь сечения пламени достигала максимума. Как следует из рис. 2, при уменьшении концентрации кислорода происходит монотонное снижение температуры пламени. Это объясняется, главным образом, эффектом разбавления продуктов сгорания. При уменьшении концентрации кислорода факел пламени смещается вниз вследствие растущей задержки воспламенения. Локализация факела от уровня CO₂ не зависит, хотя при содержании CO₂, равном 15 %, его температура резко падает по причине большей удельной теплоемкости CO₂.

На рис. 3 и 4 показано изменение средней температуры факела в функции времени. Здесь средняя температура пламени — это величина, вычисляемая интегрированием по всей области светящегося факела в двумерном отображении. На рис. 3 можно видеть снижение температуры пламени и возрастающую задержку момента появления видимого факела при снижении содержания кислорода. Сравнение данных рис. 3 и 4 показывает, что добавление CO₂ снижает тем-

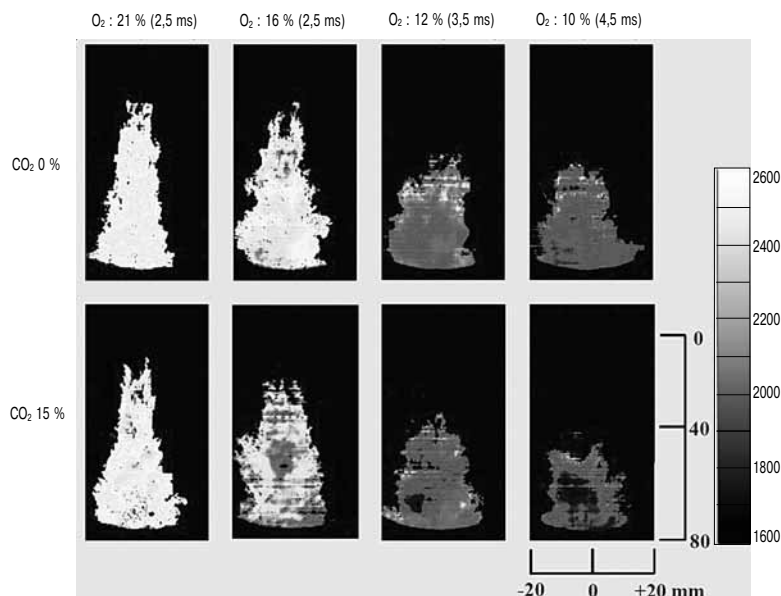


Рис. 2. Влияние концентрации кислорода на температуру факела в двумерном отображении

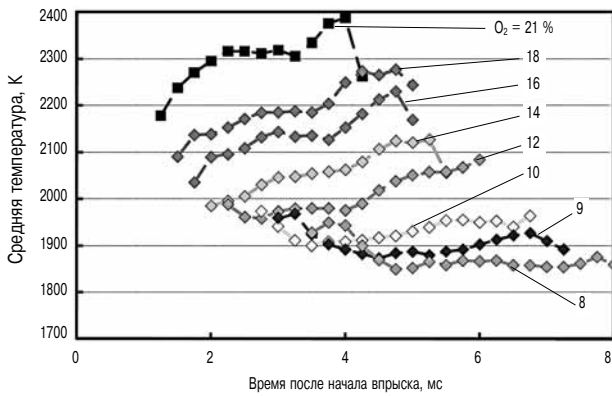


Рис. 3. Влияние содержания кислорода на среднюю температуру пламени (CO₂ 0 %)

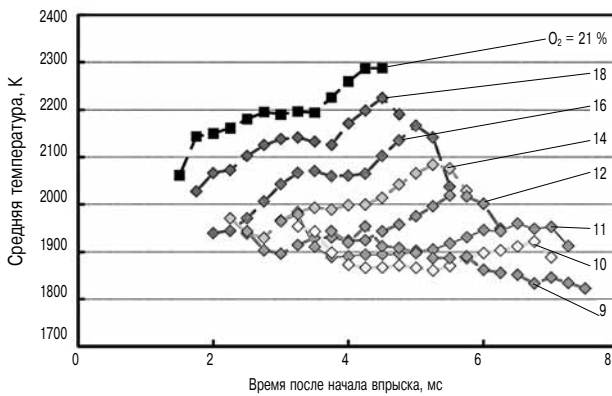


Рис. 4. Влияние содержания кислорода на среднюю температуру пламени (CO₂ 15 %)

температуру пламени примерно на 100 К. Эти результаты говорят о том, что снижение температуры пламени способствует торможению образования NO_x, за счет снижения концентрации кислорода, что эквивалентно применению EGR.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ NO_x НА 80 %

Оборудование и методика эксперимента Система снижения концентрации кислорода и увлажнения воздуха

Принципиальная схема системы снижения концентрации кислорода и увлажнения воздуха на основе полимерной мембраны показана на рис. 5.

Когда воздух во всасывающем тракте достигает полупроницаемой мембраны (рис. 5, а), молекулы кислорода проходят через мембрану легче, чем молекулы азота. Поэтому концентрация кислорода в воздухе, попадающем в камеру сгорания, ниже, чем перед мембраной. Прохождение кислорода через мембрану обусловлено перепадом давления на мембране. На рис. 5, б показано, как прохождение молекул воды через мембрану обеспечивает увлажнение воздуха во всасывающем тракте. Сочетание обоих указанных факторов приводит к тому, что в двигатель поступает воздух, отличающийся низкой концентрацией кислорода и высокой влажностью. При вычислении отно-

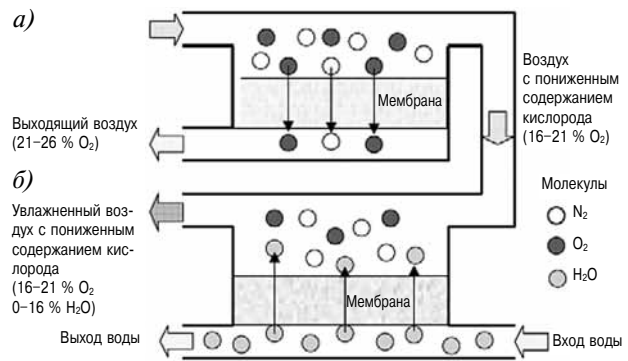


Рис. 5. Принципиальная схема системы снижения концентрации кислорода и увлажнения воздуха на основе полимерной мембраны

сительных количеств воды и кислорода, проходящих через мембрану, в качестве знаменателя используется площадь мембраны. Поэтому форма мембраны должна быть тщательно отработана, чтобы максимально увеличить ее площадь.

Экспериментальная установка

Чтобы оценить эффективность системы ORM, последняя была подключена к двигателю. В качестве объекта был выбран небольшой высокооборотный дизель из лаборатории Национального Университета Рыболовства, характеристики которого приведены в табл. 2. Поток воздуха

Таблица 2

Характеристики опытного двигателя

Тип двигателя	4-тактный с непосредственным впрыском, с турбонаддувом
Число цилиндров	4
Диаметр цилиндра, мм	110
Ход поршня, мм	125
Максимальная мощность, кВт	103
Частота вращения, об/мин	2400
Максимальное p_{me} , МПа	1,1
Отверстия распылителя, мм	5×0,32

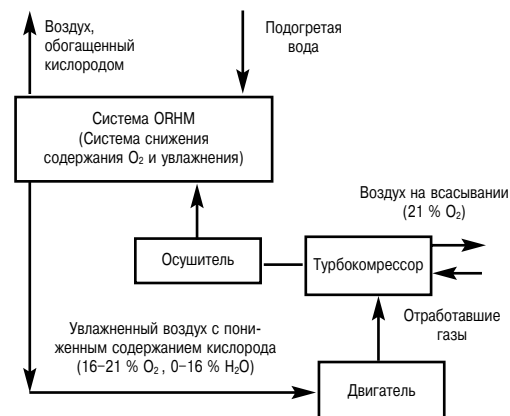


Рис. 6. Поток воздуха во всасывающем тракте и поток отработавших газов в экспериментальной установке

во всасывающем тракте и отработавших газов показаны на рис. 6. Влажность воздуха во всасывающем тракте сначала доводится до нуля с помощью осушителя, после чего концентрация кислорода устанавливается на уровне 16–21 %, а влажность задается на уровне 0–16 mol % с помощью системы увлажнения. Поскольку снижение содержания кислорода связано с выпуском части воздуха из системы, то обычно для компенсации потери воздуха требуется увеличить расход воздуха на всасывании. Проникновение кислорода через мембрану происходит под действием перепада давления, поэтому на стороне всасывания необходимо обеспечить повышенное давление. В экспериментальной установке повышенное давление создавалось не турбокомпрессором, а специальным компрессором, позволяющим поддерживать расход и давление воздуха на необходимом уровне.

Цель эксперимента

Цель эксперимента — определить зависимость снижения выбросов NO_x в зависимости от снижения концентрации кислорода и увеличения влажности воздуха на всасывании. Испытания проводились при нагрузке 25, 50, и 75 % от номинальной, причем на каждой нагрузке регистрировались следующие параметры: температура отработавших газов, концентрации NO_x , O_2 , CO и CO_2 , а также расход топлива.

Анализ результатов

Влияние концентрации кислорода на выбросы NO_x

На рис. 7 приведена зависимость выбросов NO_x от концентрации кислорода на всасывании при температуре порядка 40 °С. Концентрация кислорода изменялась в диапазоне от 16,2 до 21 %. Верхний предел допустимых выбросов NO_x для двигателя данного типа, согласно нормативам IMO Tier 3, составляет 1,96 г/кВт·ч. Как видно из графика, при снижении концентрации кислорода выбросы NO_x падают при любой нагрузке. При концентрации кислорода менее 17 % требования

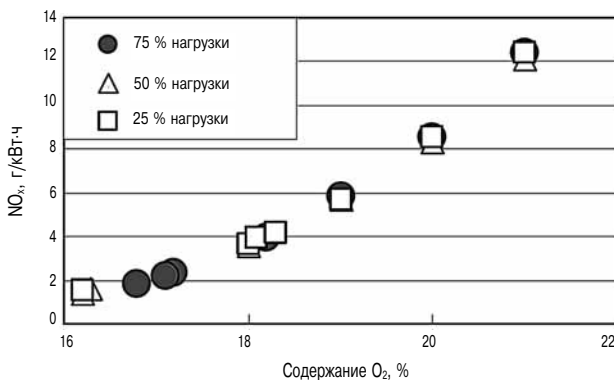


Рис. 7. Зависимость выбросов NO_x от концентрации кислорода на впуске

IMO выполняются гарантированно, без использования каких-либо дополнительных средств.

Как уже отмечалось ранее, процесс EGR ведет к росту удельной теплоемкости воздуха на всасывании, поскольку к воздуху добавляются CO_2 и H_2O , следовательно, при наличии EGR достаточной может оказаться даже меньшая степень снижения содержания кислорода. Уменьшение концентрации кислорода само по себе является менее эффективным средством снижения выбросов NO_x , нежели EGR. С другой стороны, система ORM не требует снижения температуры отработавших газов. Кроме того, процесс EGR, в отличие от NHM, связан с необходимостью очистки промывочной воды. Однако выполнить требования IMO Tier 3 с помощью мембранной системы при использовании существующих турбокомпрессоров будет непросто, поскольку для этого понадобится повышение давления во всасывающем тракте и расхода воздуха. Особенно сложно обеспечить необходимые уровни давления и расхода воздуха на низких нагрузках.

Влияние влагосодержания на выбросы NO_x

Влияние влагосодержания воздуха во впускном тракте на концентрацию кислорода при нагрузках 25 и 75 % показано на рис. 8. Из представленного графика, учитывая его практически линейный характер, следует, что концентрацию кислорода можно снижать, повышая влагосодержание

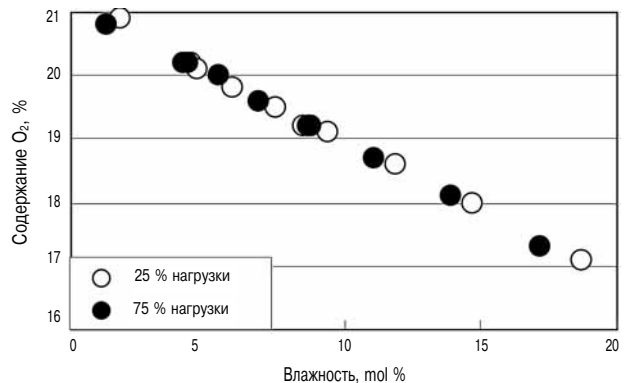


Рис. 8. Влияние влажности воздуха во впускном тракте на концентрацию кислорода

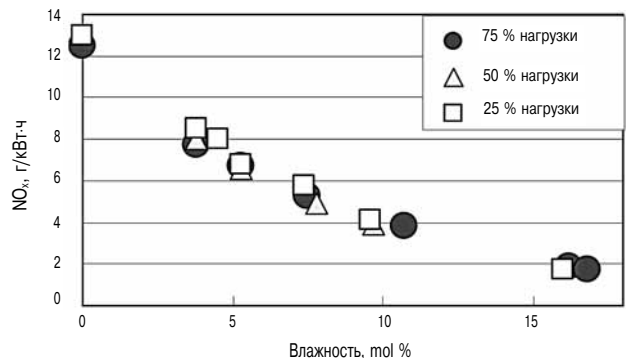


Рис. 9. Зависимость выбросов NO_x от влажности воздуха во всасывающем тракте

воздуха на всасывании. На рис. 9 показана зависимость выбросов NO_x от влажности, когда содержание кислорода в поступающем воздухе постоянно и составляет 21 %. С ростом влажности выбросы NO_x уменьшаются вследствие одновременного снижения концентрации кислорода — эффект, сочетающий в себе результаты, показанные на рис. 7 и 8. Как видно из рис. 9, требования IMO Tier 3 могут быть выполнены при условии, что содержание влаги в поступающем воздухе достигнет 15 mol %. Однако, прежде чем приступить к внедрению предлагаемой технологии в судовых установках, необходимо оценить, какая энергия понадобится для подачи и испарения воды в требуемых количествах, и насколько целесообразной окажется обсуждаемая технология с учетом необходимых затрат энергии.

Влияние одновременного изменения влагосодержания и концентрации кислорода на выбросы NO_x

На рис. 10 показаны зависимости снижения концентрации кислорода от влажности воздуха для варианта, в котором концентрации кислорода снижается только с помощью мембраны до начала увлажнения воздушного потока. Например, самый верхний график (кружки с черной заливкой) соответствует случаю, когда фильтрация воздуха через мембрану до его увлажнения не производится, а концентрация кислорода в нем соответствует базовому значению, т. е. 21 %. Третий сверху график (треугольники) соответствует случаю, когда концентрация кислорода в воздухе предварительно (перед его увлажнением) снижена до 19 %. Из рис. 10 следует, что при задании влажности воздуха на уровне 11 %, концентрация кислорода порядка 17 % и ниже легко достижима.

На рис. 11 показана зависимость между концентрацией кислорода и выбросами NO_x при различных значениях влажности. Кружками с черной заливкой обозначены состояния, в котором

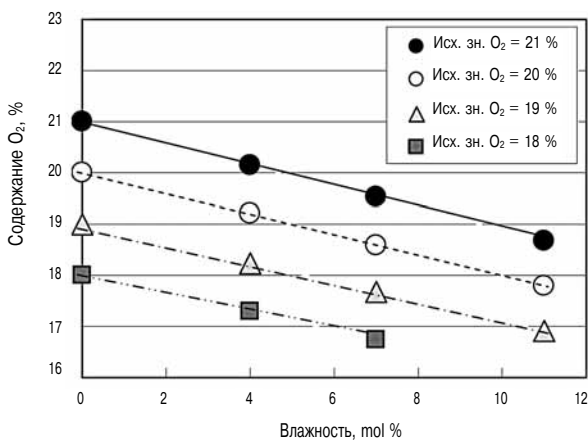


Рис. 10. Зависимость концентрации кислорода от влажности при различных исходных уровнях концентрации кислорода

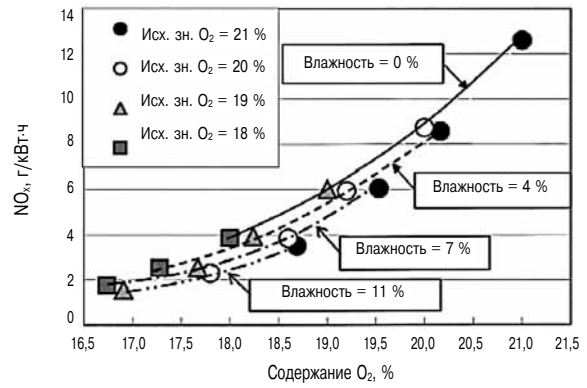


Рис. 11. Влияние концентрации кислорода на выбросы NO_x при различных значениях влажности

концентрация кислорода во всасываемом воздухе остается неизменной, а уровень выбросов NO_x при влажности 11 % снижается до 4 г/кВт·ч. Предварительное снижение концентрации кислорода в воздухе до 19 % позволяет выполнить требования IMO Tier 3 ($\text{NO}_x = 1,96$ г/кВт·ч) при значении влажности 11 mol %.

Более того, если концентрация кислорода будет вначале снижена до 18 %, то для достижения требований IMO Tier 3 влажности 7 mol % будет достаточно. Это подтверждает практическую применимость данной системы для снижения выбросов NO_x судовых дизелей путем одновременного снижения концентрации кислорода и увлажнения воздуха.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ПРЕДЛАГАЕМОЙ ТЕХНОЛОГИИ Снижение выбросов NO_x в опытном четырехтактном высокооборотном двигателе

Оборудование и методика эксперимента

В испытаниях были использованы газоразделительные мембраны, мембранные элементы (картриджи) и мембранные модули фирмы «Asahi Kasei Chemicals Corporation». На рис. 12 показана блок-схема мембранной системы снижения концентрации кислорода и увлажнения (ORHM), примененная на опытном двигателе, технические характеристики которого приведены в табл. 2. Операции снижения концентрации кислорода и увлажнения в данном случае выполнялись по отдельности. Для снижения концентрации кислорода использовались девять элементов с полыми волокнами, образующих 10 м² мембранной поверхности, или же восемь плоских элементов, образующих 7,5 м² мембранной поверхности каждый, а для увлажнения использовались четыре элемента с полыми волокнами, образующих 10 м² мембранной поверхности каждый. Воздух в двигатель подавался отдельным компрессором. Создаваемое компрессором давление использовалось для разделения газов в устройстве снижения

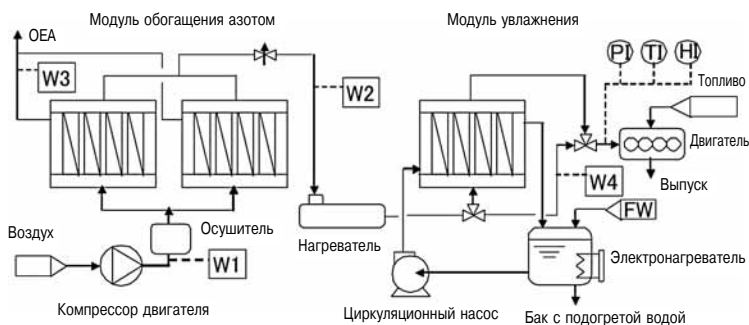


Рис. 12. Блок-схема процесса ORHM (для четырехтактного двигателя)

концентрации кислорода. В реальной установке функцию компрессора будет выполнять штатный турбонагнетатель дизеля. Влажность воздуха после компрессора снижалась до точки росы 20 °С с помощью осушителя. Воздух, выходящий из устройства снижения концентрации кислорода, нагревался с помощью электрического подогревателя и подавался в устройство увлажнения. В реальной установке необходимости в подогревателе не будет, поскольку температура воздуха на всасывании может регулироваться с помощью охладителя, установленного за турбокомпрессором. С помощью данного устройства можно менять относительную влажность от 0 до практически 100 %, а концентрацию кислорода — от 18 до 21 % по сухому воздуху. Концентрация кислорода измерялась с помощью гальванических датчиков (JKO-25, JKO), а концентрация NO_x — с помощью хемилуминесцентных анализаторов (CLM-107, Shimadzu и EXSA-240CL, Horiba).

Результаты экспериментов

Влияние концентрации кислорода и уровня влажности воздуха на выбросы NO_x исследовалось при нагрузках 75, 50 и 25 % от номинальной. Соотношение кислорода и условного топлива поддерживалось в диапазоне от 1,6 до 4,3 (рис. 13). Как показывают приведенные на рис. 14 зависимости, при снижении концентрации кислорода скорость образования NO_x существенно снижается, достигая значения 2,0 г/кВт·ч при концентрации кислорода 18 %. Выбросы NO_x, соответствующие точкам на этом графике при значении концентрации кислорода 21 %, являются стандартными для данной модели двигателя. Верхняя кривая на графике соответствует сухому воздуху при температуре около 30 °С и концентрации водяного пара порядка 2,0 mol %, а нижняя кривая соответствует состоянию высокой влажности при температуре около 70 °С и концентрации водяного пара порядка 15,0 mol %. Из результатов эксперимента можно сделать вывод о том, что для достижения требований IMO Tier 3 оптимальной является концентрация кислорода порядка 17–18 %, а

влажный воздух подавляет образование NO_x более эффективно, нежели сухой. Последнее объясняется возрастанием удельной теплоемкости смеси при ее увлажнении. Выбросы NO_x рассчитывались по расходу отработавших газов методом углеродного баланса. На рис. 15 показана зависимость выбросов NO_x от соотношения вода/топливо при нагрузке, равной 75 %. Изображенная на рисунке кривая отражает влияние влажности на образование NO_x, а область, расположенная ниже указанной кривой — влияние снижения концентрации кислорода.

Увлажнение воздуха без снижения концентрации кислорода также приводит к снижению выбросов NO_x, однако наибольший эффект увлажнение воздуха дает именно в сочетании с уменьшением концентрации кислорода.

Можно отметить два ключевых фактора, определяющих возможность практического применения системы ORHM: массовый баланс воздуха на входе и скрытое тепло воды, участвующей в процессе. Если обозначить количество воздуха, поступающего к мембранным модулям W₁, количество воздуха, выходящего из устройства снижения концентрации кислорода W₂, количество

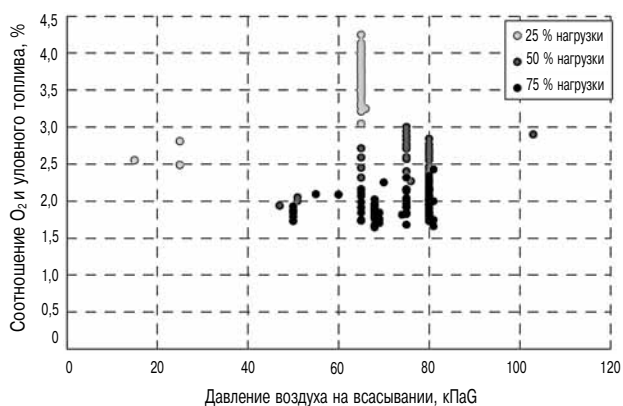


Рис. 13. Диапазон избытка кислорода, наблюдавшийся в ходе экспериментов

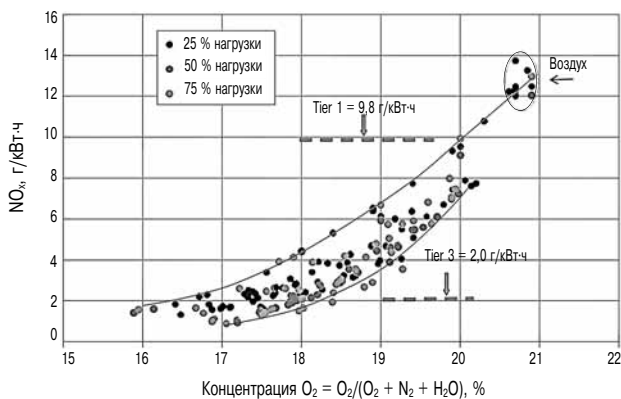


Рис. 14. Соотношение между образованием NO_x и концентрацией кислорода

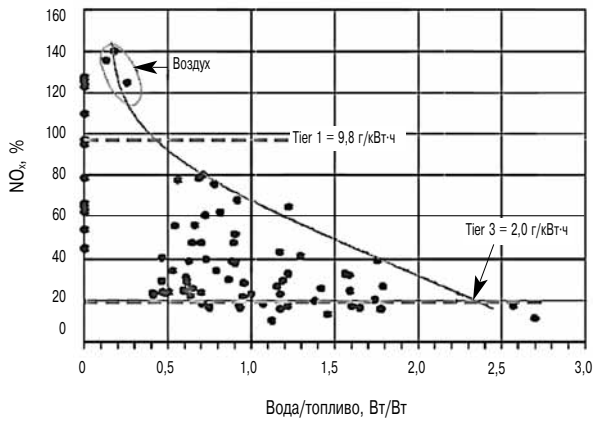


Рис. 15. Связь между образованием NO_x и соотношением воздух/топливо при нагрузке 75 %

обогащенного кислородом воздуха, выходящего из устройства снижения концентрации кислорода W_3 , и количество воздуха, выходящего из увлажняющего устройства W_4 , то массовый баланс можно выразить как $(W_4 - W_1)/W_1$, где $W_1 = W_2 + W_3$. При отрицательном балансе имеет место недостаток воздуха на входе в двигатель по сравнению с количеством воздуха, поступающего на вход мембранных модулей, тогда как при положительном балансе имеет место избыток воздуха на входе в двигатель по сравнению с количеством воздуха, поступающего на вход мембранных модулей. С учетом характеристик штатного турбокомпрессора желательно поддерживать входной баланс на уровне выше 10 %.

Снижение выбросов NO_x в опытном двухтактном малооборотном двигателе Оборудование и методика эксперимента

На рис. 16 показана блок-схема системы ORHM, которая использовалась в экспериментах, проводившихся на двухтактном одноцилиндровом двигателе типа MTE-40 производства «Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd». Технические характеристики опытного двигателя с системой ORHM приведены в табл. 3. В экспериментах, проводившихся в «Национальном Университете Рыболовства», на четырехтактном двигателе для облегчения анализа результатов эксперимента вместо штатного турбонагнетателя использовался отдельный компрессор. В данном случае использовался штатный турбонагнетатель двигателя, что существенно отличает условия проведения экспериментов. После промежуточного воздухоохладителя был установлен трехходовой клапан, позволяющий переключать подачу воздуха между штатным входом в двигатель и системой с полимерной мембраной. Всего в системе использовано 56 элементов с полыми волокнами, каждый из которых имеет 10 м² мембранной поверхности. После снижения концентрации кислорода воздух с помощью нагревателя доводился до заданной

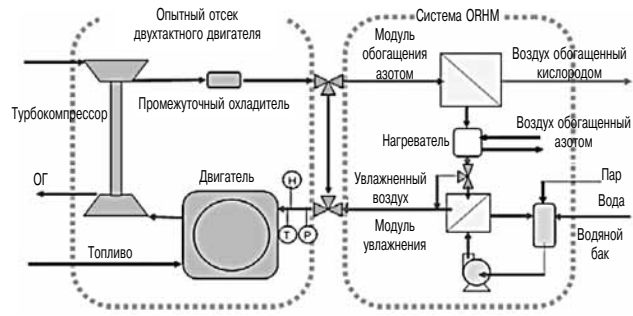


Рис. 16. Блок-схема процесса ORHM (для двухтактного двигателя)

Таблица 3

Технические характеристики опытного двухтактного двигателя

Мощность, кВт	857
Скорость, об/мин	171
Диаметр цилиндра, мм	400
Ход поршня, мм	1360
p_{me} , МПа	1,72

температуры перед его поступлением в систему увлажнения, состоящую из 32 аналогичных элементов с полыми волокнами. В процесс увлажнения разнонаправленные потоки воздуха и горячей воды движутся с обеих сторон мембраны, выполняющей роль теплообменника, причем температура увлажненного воздуха практически равна входной температуре горячей воды. Параметры поступающего воздуха измерялись с помощью гигрометрического манометра и термометра, установленных на входе в вентиляционную камеру машинного отделения, а общая концентрация NO_x в отработавших газах измерялась с помощью датчика NO_x типа VA3000 фирмы «Horiba». Выбросы NO_x рассчитывались по расходу отработавших газов методом углеродного баланса.

Результаты экспериментов

Влияние концентрации кислорода и уровня влажности всасываемого воздуха на выбросы NO_x исследовалось при нагрузках 25, 50 и 75 % от номинальной. Зависимость выбросов NO_x от концентрации кислорода в воздухе показана на рис. 17. Максимальные величины степени снижения NO_x при исходном содержании кислорода в воздухе 20,9 % составили 75, 84 и 88 % при значениях нагрузки двигателя 75, 50 и 25 % соответственно. При нагрузке 75 % для более эффективной работы мембранного модуля требуется давление наддува порядка 200 кПа, что приводит к потерям воздуха и ухудшает воздухообеспечение двигателя.

Степень снижения концентрации кислорода при нагрузке 75 % может быть откорректирована за счет увеличения числа используемых мембран-

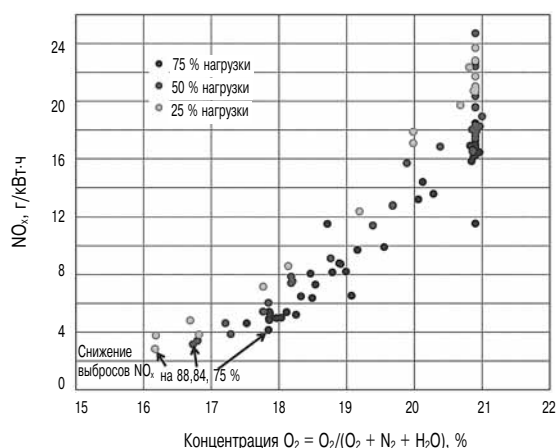


Рис. 17. Соотношение между образованием NO_x и концентрацией кислорода (для двухтактного двигателя)

ных модулей, что дает дополнительное снижение концентрации кислорода в воздухе. Это, однако, приводит к дальнейшему росту потерь воздуха на впуске, поэтому эксперимент был остановлен при степени снижения выбросов NO_x , равной 75 %. Учитывая достигнутый на данном двигателе базовый уровень выбросов IMO Tier 2, этого оказалось достаточно для соответствия требованиям IMO Tier 3.

При работе с системой ORHM расход топлива возрастает по сравнению с работой на штатном режиме примерно на 8 %. Показатели расхода топлива должны быть улучшены путем оптимизации рабочих параметров двигателя.

Подводя итоги, можно утверждать, что технология ORHM является эффективным средством достижения требований IMO Tier 3 по выбросам NO_x для четырехтактных высокооборотных двигателей, и может быть полезной также для двухтактных малооборотных двигателей.

Практическое применение системы ORHM в судовых условиях

Схема двигателя с системой ORHM показана на рис. 18. Воздух после турбокомпрессора (TC) через промежуточный воздухоохладитель (IC) поступает при заданной температуре в агрегат снижения концентрации кислорода (MM-1). Часть кислорода удаляется с помощью полимерной мембраны под действием давления, создаваемого турбокомпрессором. Таким образом, на выходе

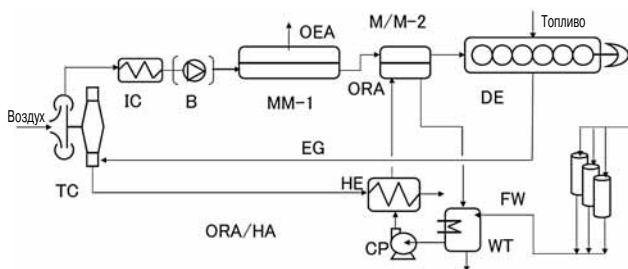


Рис. 18. Схема воздухообеспечения двигателя с ORHM

агрегата MM-1 образуется воздух со сниженной концентрацией кислорода (oxygen-reduced air — ORA), который можно назвать также воздухом, обогащенным азотом (nitrogen-enriched air — NEA). Воздух со сниженной концентрацией кислорода, увлажняется (humidified air — HA) в агрегате (MM-2) и затем поступает в двигатель. Отработавшие газы направляются в турбокомпрессор. Циркуляция подогретой воды, омывающей вторичную поверхность теплообмена увлажняющего агрегата, обеспечивается циркуляционным насосом (circulation pump — CP). Пресная вода (fresh water — FW), поступающая из водяного бака (water tank — WT), подогревается в теплообменнике (heat exchanger — HE) и направляется в увлажняющий агрегат. Скрытая теплота парообразования воды, испаряющейся в увлажняющем агрегате, отнимается у циркулирующей воды, вследствие чего возникает разность температур воды на входе и на выходе увлажняющего агрегата. В результате выпуска обогащенного кислородом воздуха (OEA), содержащего 25–28 % кислорода, общее количество воздуха на впуске соответственно уменьшается, хотя это частично компенсируется за счет паров воды в увлажненном воздухе.

В типичном случае входной баланс, рассчитываемый как [воздух — ORA, HA]/воздух, поддерживается, как уже говорилось ранее, на уровне выше — 10 %, следовательно, при определенных условиях может происходить потеря воздуха на всасывании. Поэтому важно обеспечить согласование работы ORHM и турбокомпрессора. Еще одно практическое соображение состоит в том, что для увлажнения следует использовать пресную, а не соленую воду (поскольку газоразделительная мембрана непроницаема для соли), чтобы в двигатель поступал чистый водяной пар. Для эффективного увлажнения используемые мембраны должны иметь достаточно развитую поверхность. Для снижения концентрации кислорода и увлажнения теоретически можно использовать одни и те же мембранные модули, хотя в реальности для каждого конкретного проекта необходимо будет решать, какой вариант предпочтительнее — общая система снижения концентрации кислорода и увлажнения, или же отдельные системы. Выбор варианта определяют такие факторы как удобство обслуживания, ресурс мембранных модулей и простота управления работой системы, хотя алгоритмы такого управления могут оказаться достаточно сложными. Давление насыщенного пара, вычисляемое по уравнению Тетенса, зависит только от температуры [12]. Как видно из рис. 19, эффект разбавления воздуха при его увлажнении ослабевает по мере роста общего давления в системе. Поскольку давление наддува при снижении нагрузки двигателя

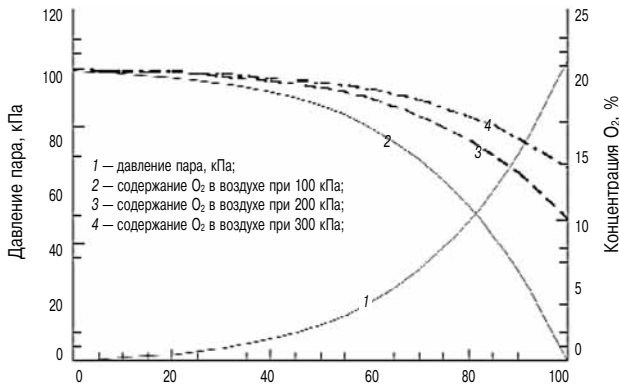


Рис. 19. Давление водяного пара, рассчитанное по уравнению Тетенса

уменьшается, соответственно уменьшается способность агрегата ММ-1 к снижению концентрации кислорода, в то время как увлажняющее действие агрегата ММ-2 усиливается. Таким образом, процессы снижения концентрации кислорода в воздухе и его увлажнения действуют однонаправленно. В реальных установках источником теплоты для парообразования и увлажнения заряда могут стать тепло отработавших газов и тепло охлаждающих жидкостей.

Возвращаясь к рис. 18, отметим, что нагнетатель (В) при необходимости может быть использован для повышения давления воздуха на всасывании. В этом случае мощность, потребляемая нагнетателем, также должна быть учтена.

Эффект подавления образования NO_x увеличивается при совместном применении ORM и водотопливной эмульсии (water emulsion fuel — WEF), представляющей еще один возможный способ увлажнения рабочей смеси. Данный метод в дальнейшем обязательно будет изучен в качестве одного из перспективных путей снижения выбросов NO_x.

ВЫВОДЫ

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

➤ Температура пламени в камере сгорания при уменьшении концентрации кислорода снижается, главным образом, благодаря эффекту разбавления, а также за счет повышения концентрации CO₂ — вследствие увеличения удельной теплоемкости смеси. Оба указанных эффекта приводят к снижению выбросов NO_x.

➤ Снижение выбросов NO_x при уменьшении концентрации кислорода имеет место при любой нагрузке двигателя. Для достижения уровня требований IMO Tier 3 достаточно просто снизить концентрацию кислорода до уровня не более 17 % (для сухого воздуха).

➤ Снижение выбросов NO_x происходит при увеличении влажности всасываемого воздуха, что также сопровождается уменьшением концен-

трации кислорода. Для достижения уровня требований IMO Tier 3 достаточно увеличить влажность воздуха на всасывании как минимум до 16 mol %.

➤ В зависимости от конкретных условий работы двигателя, выбросы NO_x могут быть эффективно снижены путем одновременного уменьшения концентрации кислорода на всасывании и увеличения влажности воздуха.

➤ Испытания, проведенные на одноцилиндровом отсеке двухтактного двигателя мощностью 865 кВт, подтвердили эффективность системы ORHM как средства снижения выбросов NO_x до уровня, соответствующего требованиям IMO Tier 3.

➤ Как показывают расчеты, для снижения выбросов NO_x до уровня нормативов IMO Tier 3 в двухтактном двигателе концентрация кислорода должна находиться в диапазоне 17–17,5 % при температуре точки росы порядка 60–65 °С (что соответствует температуре продувочного воздуха 65–70 °С).

➤ При работе двигателя с системой ORHM расход топлива возрастает примерно на 8 % по сравнению с обычными условиями (т. е. при содержании кислорода в воздухе, равном 21 %). Это подтверждает необходимость дальнейших исследований, направленных на оптимизацию процесса сгорания в условиях недостатка кислорода и повышенной влажности.

Литература

1. Exhaust Gas Emission Control Today and Tomorrow, MAN Diesel, (2008).
2. Preservation Technologies of the Environment for Designers of Large Marine Diesel Engines, The Japan Society of Mechanical Engineers, (2010), — P. 1–41.
3. The Trend of Elemental Technologies on the Development of Clean Diesel (in Japanese), NTS, (2008), — P. 127–146.
4. Stookey D., Nemser S. and Keating E. Oxygen/Nitrogen Enriched Air for Energy Application. Proc. of AIChE, November 17–21, Philadelphia, PA, (2008).
5. Nemser, S. and Callaghan, K. Combustion Engine Air Supply System. Patent US5960777, WO99/42709, (1999).
6. Nemser S. Air-intake System for Mobile Engines. Patent US5051113, (1991).
7. Melhus O., Garasen I., Haukebo B., Langnes K. and Stookey D. NO_x Emission Reduction by Use of N₂ Diluted Charge Air. Proc. of CIMAC, Bergen, № 218, (2010).
8. Pedersen M.F. Two-Stroke Engine Emission Reduction Technology: State-of-the-Art. Proc. of CIMAC, Bergen, № 85, (2010).
9. Azetsu A., Hagio H. and Aoki M. A Study on the Spray Combustion Characteristics of Bio Diesel Fuel. Proc. 26th CIMAC World Congress, 2010, CD-ROM.
10. Wakisaka Y. and Azetsu A. Effect of Fuel Injection Rate Shaping and Injection Pressure on Intermittent Spray Combustion. SAE Paper 2000-01-2793, 2000.
11. Matsui Y., Kamimoto T. and Matsuoka S. A Study on the Time and Space Resolved Measurement of Flame Temperature and Soot Concentration in a D.I. Diesel Engine by the Two-Color Method. SAE Paper 790491, 1979.
12. Murray, F.W. On the Computation of Saturation Pressure. J. Appl. Meteorology, 6, (1967), — P. 203–204.

**ОПЫТ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛИННОХОДОВОГО
СРЕДНЕБОРОТНОГО ДВИГАТЕЛЯ
С ДВУХСТУПЕНЧАТЫМ ТУРБОНАДДУВОМ
И ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ ЦИКЛОМ МИЛЛЕРА**

*Mathias Fiedler, Hugo Fiedler,
FMC Fiedler Motoren GmbH, Германия
Peter Boy,*

Flensburg University of Applied Sciences, Германи

Реферат

В настоящем докладе представлены результаты исследований, проводившихся на длинноходовом среднеоборотном двигателе. Работа проводилась специалистами Фленсбургского университета прикладных наук и фирмы «ABB Turbo Systems» на опытном трехцилиндровом длинноходовом дизеле типа FMC 4524, установленном в лаборатории Фленсбургского университета. Двигатель, спроектированный на соответствие экологическим нормативам IMO Tier 2, отличается следующими конструктивными особенностями:

- большое отношение хода поршня к диаметру цилиндра: $s/d = 450/240 \text{ мм} = 1,875$;
- высокий механический КПД, который в значительной степени обеспечивается конструкцией коленвала, выполненной в соответствии с правилами классификационных обществ;
- камера сгорания оптимизирована на высокую степень сжатия (17,8);
- двухступенчатая система топливоподачи высокого давления с переменным давлением впрыска;
- одноступенчатый наддув;
- стандартные углы газораспределения (впускной клапан).

В ходе экспериментов конструкция двигателя дополнена двухступенчатым наддувом и газораспределением по циклу Миллера. Одновременно была модифицирована выпускная система с целью улучшения рабочих параметров двигателя на частичных нагрузках и его пусковых характеристик. Кроме того, в процессе экспериментов менялись фазы газораспределения по выпуску и характеристики впрыска. Данная работа ориентирована в первую очередь на снижение выбросов CO_2 и частиц (PM) при достижении уровня нормативов IMO Tier 3 по NO_x . Исследовались варианты изменения угла закрытия впускного клапана до 42° ПКВ перед НМТ («Miller-42») и 50° ПКВ перед НМТ («Miller-50»). В качестве первых результатов применения варианта «Miller-42» можно назвать снижение расхода топлива до $168 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$ и снижение выбросов CO_2 примерно на 6 % по сравнению с базовой конфигурацией. Выбросы частиц, достаточно низкие и в базовом варианте, в ходе экспериментов оставались на том же уровне. Вопреки ожиданиям, удалось снизить

выбросы окислов азота на 20 % примерно до $8 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$. Эксперименты планируется продолжить в направлении дальнейшего усиления эффекта Миллера, с увеличением угла закрытия впускного клапана до 60° ПКВ перед НМТ. Будут также оценены возможности дальнейшего снижения выбросов NO_x , с тем, чтобы достичь уровня IMO Tier 3. Это может быть достигнуто за счет применения EGR и впрыска водотопливной эмульсии в цилиндры.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время действуют нормативы IMO Tier 2. Уже на 2016 г. намечен ввод в действие нормативов IMO Tier 3 в Северо-американской зоне ECA. Вот почему развитие современных двигателей идет, главным образом, в направлении повышения экологических показателей.

Причем снижать нужно выбросы не только окислов азота и двуокиси серы, но также углекислого газа и твердых частиц.

Существуют лишь два способа снижения выбросов SO_2 : очистка отработавших газов и изменение состава топлива. Что же касается выбросов NO_x , то здесь возможности гораздо шире.

Одна из таких возможностей — каталитическая очистка (SCR) и применение фильтров частиц — по крайней мере, до тех пор, пока допускается, с определенными ограничениями, использование тяжелых топлив, и пока производители и операторы могут себе позволить нести расходы, связанные с соответствующим усложнением конструкции и увеличением объема обслуживания.

Вместе с тем существуют «внутренние» и «внешние» методы влияния на термодинамические процессы в двигателе, позволяющие добиться снижения вредных выбросов. К числу таких методов относятся:

- оптимизация размерности двигателя;
- оптимизация параметров впрыска;
- оптимизация фаз газораспределения;
- оптимизация турбонаддува;
- рециркуляция отработавших газов;
- прямой впрыск воды в камеру сгорания;
- система увлажнения воздуха;
- использование водотопливной эмульсии.

Опытная установка

Для проверки эффективности некоторых из перечисленных выше мероприятий была разработана программа исследований на опытном двигателе типа FMC 4524 специалистами Фленсбургского университета прикладных наук совместно с фирмой «ABB Turbo Systems» и Фленсбургским НИИ судостроения (Institute for Ship Research, Flensburg).

Конструкция двигателя, первоначально созданного для изучения особенностей рабочего процесса в длинноходовых машинах, позволяет достичь вы-

соких значений степени сжатия — до 1:19 без изменения формы камеры сгорания. Основные характеристики двигателя приведены в табл. 1.

Кроме того, опытный двигатель оборудован высокоэффективной 2-ступенчатой системой впрыска.

Система впрыска топлива является гибридом системы common rail и насоса с механическим (от кулачкового вала) приводом, используемого в качестве первой ступени, который создает постоянное давление на входе плунжерного насоса второй ступени. Кроме того, давление, создаваемое в первой ступени, подпирает иглу распылителя. Давление на выходе плунжерного насоса действует на иглу форсунки, открывая ее, как в обычных системах впрыска (рис. 1)

Высокое противодавление на иглу распылителя позволило поднять давление открытия до 1300 бар, а давление закрытия — до 800 бар, притом что давление в первой ступени составляет 500 бар.

Это обеспечивает оптимальную форму факела на протяжении всего процесса впрыска. Тем самым устраняются области пониженного давления впрыска, наблюдаемые в начале и в конце впрыска в обычных системах и в некоторых системах common rail.

На рис. 2 показано влияние давления на выходе первой ступени на давление впрыска, подъем иглы распылителя и массовый расход топлива. При большом давлении в первой ступени движение иглы начинается с запаздыванием и происходит относительно медленно из-за большой противодействующей силы закрытия, действующей на иглу. Результатом являются сглаженная форма кривых топливоподачи и более плавное начало процесса сгорания (рис. 3).

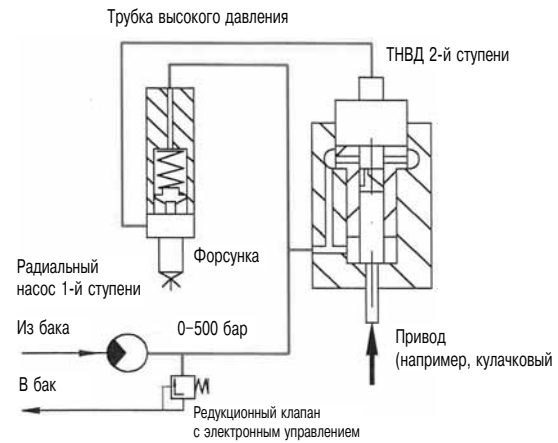


Рис. 1. Двухступенчатая система впрыска

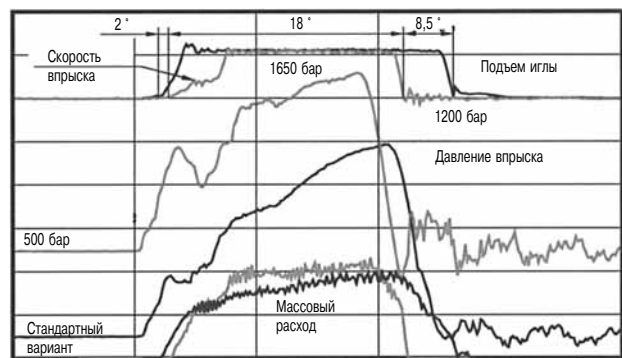


Рис. 2. Влияние давления на выходе первой ступени на давление впрыска, подъем иглы распылителя и массовый расход топлива

При этом, чем выше скорость и длительность впрыска, тем больше скорость тепловыделения, короче продолжительность сгорания и выше термодинамический КПД.

Таблица 1

Исходные технические характеристики двигателя

FMC 4524 — Параметры двигателя	
Диаметр цилиндра, мм	240
Ход поршня, мм	450
s/d	1,875
Скорость, об/мин	600 (720)
Предельно допустимые выбросы NO _x по Tier 2, г/кВт·ч	10,10
Предельно допустимые выбросы NO _x по Tier 3 ECA, г/кВт·ч	2,50
ВМЕР, бар	24 (26)
Степень сжатия	(12)...17,8...(19)
Максимальное давление в цилиндре, бар	220
Число цилиндров	3 (6)
Турбонаддув	ABB Turbo Systems
Система впрыска	2-ступенчатая система FMC 2

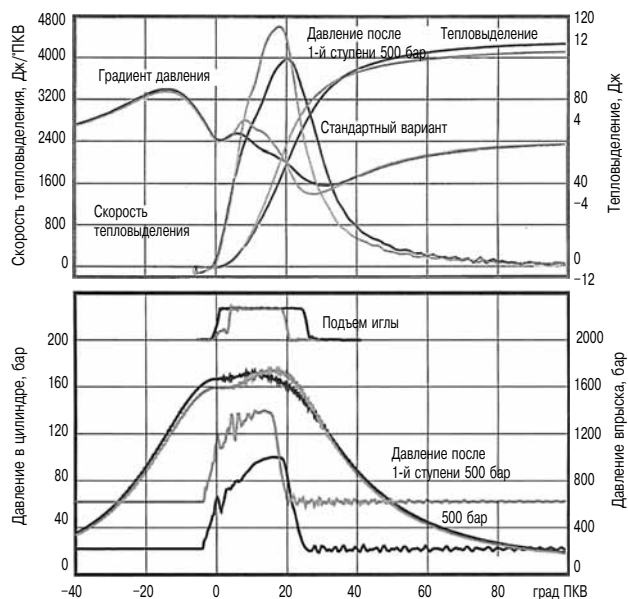


Рис. 3. Влияние давления на выходе первой ступени на характеристики впрыска и сгорания

Одноступенчатый наддув и цикл Миллера

Программа исследований базируется на результатах изучения двигателя FMC 4524, явившегося частью совместного проекта CLEAN I (1995–1998).

В качестве базовой была выбрана исходная конфигурация двигателя («А»), оптимизированная по расходу топлива, имеющая стандартные углы газораспределения, отличающаяся высокой интенсивностью впрыска, и, как следствие, высоким уровнем выбросов NO_x, превосходящим допустимый по нормам IMO Tier 1. Исходя из этого, была поставлена задача достичь уровня требований Tier 2, которая, предположительно, может быть решена одним из следующих способов:

- стандартные углы газораспределения (конфигурация двигателя «Буег»), с использованием первой ступени системы впрыска;
- цикл Миллера с углом закрытия впускного клапана 40° ПКВ до НМТ, одноступенчатый турбонаддув и высокая интенсивность впрыска (конфигурация двигателя «С»); характеристики турбокомпрессора оптимизированы для получения требуемых (повышенных) значений степени сжатия и расхода воздуха.

В обоих случаях выполнение требований IMO Tier 2 по NO_x возможно (табл. 3). В конфигурации «В» это достигается за счет увеличения расхода топлива и почти двойного роста выбросов частиц. Применение цикла Миллера несколько снижает расход топлива и позволяет снизить выбросы частиц примерно на 40 %. Подробнее результаты испытаний показаны на рис. 4.

Переход на цикл Миллера позволяет снизить выбросы NO_x примерно на 40 %, при этом также существенно улучшаются показатели по расходу топлива (BSFC) и выбросам частиц (PM) на

Таблица 2

Варианты конфигурации двигателя Clean I

Конфигурация двигателя	Угол закрытия впускного клапана	Конфигурация турбокомпрессора	Давление впрыска первой ступени, бар
А	+35°	1-ступенч.	500
В	+35°	1-ступенч.	50–200
С	–40°	1-ступенч. модиф.	500

Таблица 3

Результаты испытаний варианта Clean I

Конфигурация двигателя	Цикл E2						BSFC мин	
	NO _x		BSFC		PM		г/кВт·ч	Δ %
	г/кВт·ч	Δ %	г/кВт·ч	Δ %	мг/м ³	Δ %		
А	14,0	—	175	—	0,06	—	173	—
В	10,1	–28	186	6	0,16	196	184	7
С	9,3	–34	174	–1	0,03	–38	172	–1

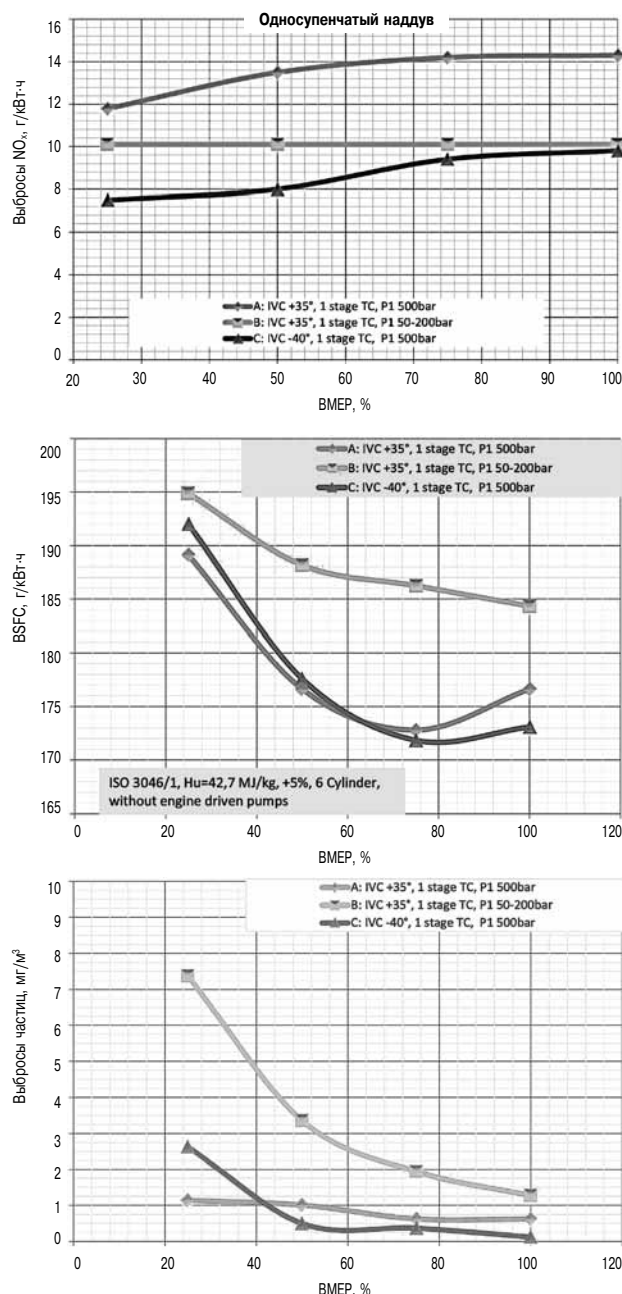


Рис. 4. Результаты испытаний CLEAN I

больших нагрузках. При нагрузках менее 50 % величины BSFC и PM оказываются несколько выше по сравнению с базовой конфигурацией («А») из-за недостаточного воздушного заряда на малых нагрузках при одноступенчатом наддуве.

Двухступенчатый турбонаддув и «Миллер-40»

Дальнейшее усиление эффекта Миллера невозможно из-за существующих ограничений по степени повышения давления и КПД турбокомпрессора, поэтому двигатель был переведен на двухступенчатый турбонаддув с промежуточным охлаждением.

Одновременно в конструкцию выпускной системы и фазы газораспределения были внесены

Таблица 4

Конфигурация двигателя с предельным значением эффекта Миллера

Конфигурация двигателя	Угол закрытия впускного клапана	Конфигурация турбокомпрессора	Давление впрыска первой ступени, бар
A	+35°	1-ступ.	500
C	-40°	1-ступ. модиф.	500
D	-42°	2-ступ.	500
E	-55°	2-ступ.	500
F	-63°	2-ступ.	300

Таблица 5

Результаты испытаний с предельным значением эффекта Миллера

Конфигурация двигателя	Цикл E2						BSFC мин	
	NO _x		BSFC		PM		BSFC мин	
	г/кВт·ч	Δ %	г/кВт·ч	Δ %	мг/м ³	Δ %	г/кВт·ч	Δ %
A	14,0	—	175	—	0,69	—	173	—
C	9,3	-34	174	-1	0,43	-38	172	-1
D	9,6	-32	177	1	0,43	-38	173	0
E	8,0	-43	172	-2	0,67	-3	168	-3
F	5,6	-60	175	0	1,07	55	171	-1

некоторые изменения, направленные на оптимизацию характеристик подачи воздуха на частичных нагрузках.

Указанные изменения сделали возможной работу двигателя даже при экстремальных значениях эффекта Миллера без каких-либо дополнительных мероприятий, вроде регулируемого угла открытия впускного клапана или подачи воздуха из внешнего источника. При этом на всех режимах удалось поддерживать уровни температур в выпускной системе и в турбокомпрессоре в допустимых пределах.

Сравнение результатов испытаний двигателя при IVC порядка 40° ПКВ до НМТ (конфигурации «С» и «D») показывает небольшой рост NO_x при 50 %-ной нагрузке, но в любом случае этот показатель остается значительно ниже допустимого по IMO Tier 2 (табл. 4).

BSFC при полной нагрузке не меняется, однако наблюдается существенный рост данного показателя при работе по испытательному циклу E2 в результате увеличения расхода топлива на долевых нагрузках. Выбросы частиц практически не изменяются (табл. 5).

При данных условиях двухступенчатый наддув в варианте «Миллер-40» не дает сколько-нибудь существенных преимуществ по сравнению с одноступенчатым.

Экстремальный цикл Миллера

При использовании экстремального цикла Миллера двухступенчатый наддув является един-

ственным способом обеспечить достаточно высокое давление наддува (до 6,2 бар).

Дальнейшее увеличение угла закрытия выпускного клапана позволяет снизить выбросы NO_x — до 5,6 г/кВт·ч при IVC 63° ПКВ до НМТ (рис. 5).

По всей видимости, оптимальное значение BSFC достигается при IVC 55° ПКВ до НМТ, при этом выбросы NO_x находятся на 20 % ниже предельно допустимого значения по IMO Tier 2.

Минимальный расход топлива — 168 г/кВт·ч наблюдался при 75 %-ной нагрузке, однако на частичных нагрузках BSFC оказывается значительно выше, чем в исходной конфигурации «А».

Достигнутый низкий уровень выбросов NO_x теоретически оставляет возможность дальнейшей

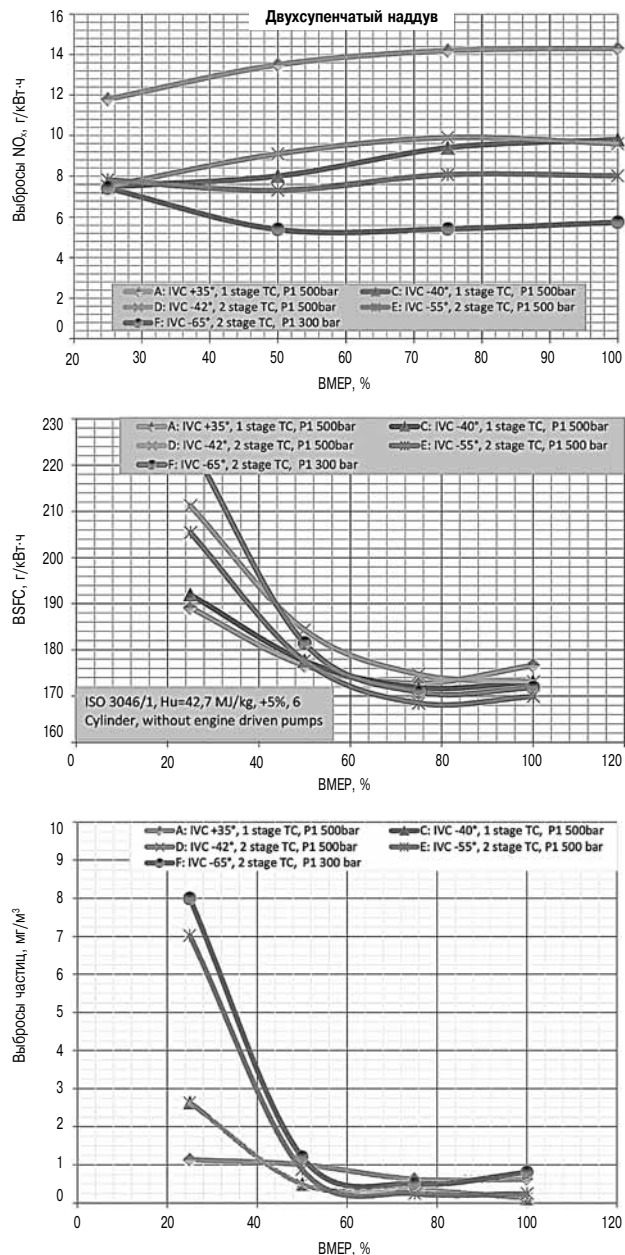


Рис. 5. Сравнение результатов испытаний вариантов с экстремальным циклом Миллера

оптимизации BSFC например, за счет увеличения угла опережения впрыска. Возможный выигрыш в данном случае невелик, поскольку кривая NO_x/SOI достаточно пологая.

В конфигурации «F» (IVC 63° ПКВ до НМТ) наблюдается лишь незначительный рост BSFC на высоких нагрузках, однако на долевых нагрузках расход топлива заметно увеличивается.

Подобным же образом ведут себя выбросы частиц: при нагрузках выше 50 % концентрация частиц сохраняется неизменной или даже уменьшается по сравнению с базовой конфигурацией («A»), однако на долевых нагрузках наблюдается ее резкий рост.

Отмеченный характер изменения показателей двигателя, по всей видимости, является следствием недостатка воздуха на низких и промежуточных нагрузках. Давление открытия иглы распылителя остается высоким — 1200 бар благодаря высокому давлению на выходе первой ступени системы впрыска. Форма факела остается оптимальной даже при малых нагрузках.

Увеличение на долевых нагрузках BSFC и выбросов частиц при повышении температуры газов и падением коэффициента избытка воздуха, очевидным образом демонстрируют достижимые пределы усиления эффекта Миллера, по крайней мере, в данных условиях.

При увеличении угла закрытия впускного клапана давление наддува растет. С другой сто-

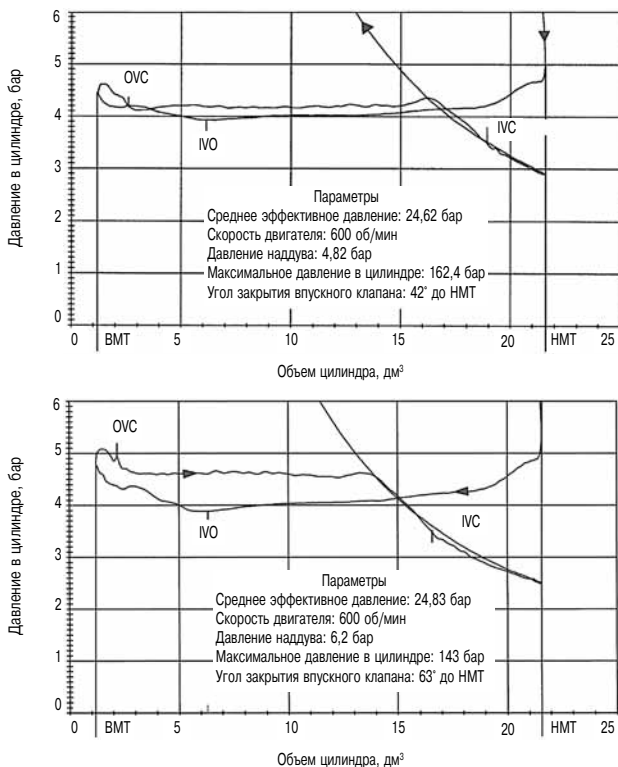


Рис. 6. Диаграмма p – V с низким давлением для вариантов «Миллер-42» и «Миллер-63»

роны, максимальное давление в цилиндре при этом падает, что открывает возможности для дальнейшем оптимизации за счет, например, совершенствования системы турбонаддува или повышения степени сжатия (рис. 6).

Выполнение требований IMO Tier III ECA по выбросам

В поисках решения, которое бы обеспечило выполнение нормативов IMO Tier 3 по окислам азота, было исследовано влияние интенсивности впрыска на выбросы в условиях экстремального цикла Миллера, при снижении давления на выходе первой ступени впрыска до 100 бар (рис. 7).

В конфигурации «Миллер-55» влияние интенсивности впрыска на выбросы NO_x и BSFC проявляется так же, как и при стандартных уг-

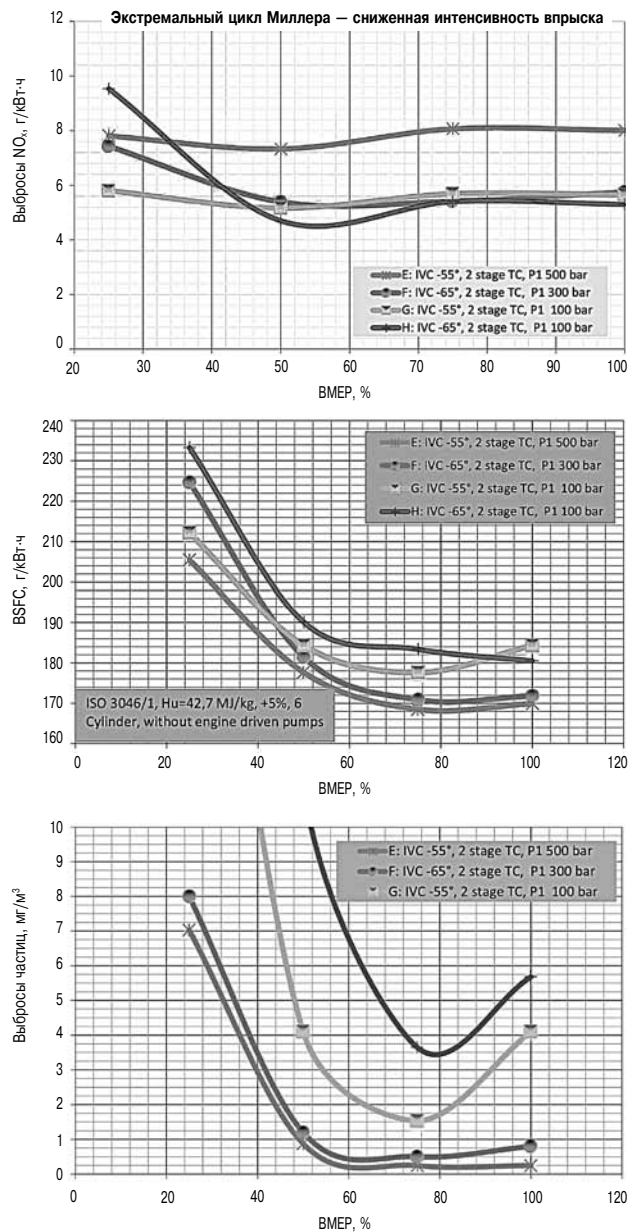


Рис. 7. Влияние интенсивности впрыска на выбросы для экстремального цикла Миллера в различных конфигурациях

Таблица 6

Конфигурация с предельным значением эффекта Миллера: уменьшенная интенсивность впрыска и FWE

Конфигурация двигателя	Угол закрытия впускного клапана	Конфигурация с турбокомпрессором и FWE	Давление впрыска первой ступени, бар
A	+35°	1-ступ.	500
E	-55°	2-ступ.	500
F	-63°	2-ступ.	300
G	-55°	2-ступ.	100
H	-63°	2-ступ.	100
I	-55°	2-ступ. FWE 25%	100
K	-55°	2-ступ. FWE 40%	100

Таблица 7

Результаты испытаний с предельным значением эффекта Миллера: уменьшенная интенсивность впрыска и FWE

Конфигурация двигателя	Цикл E2						BSFC мин	
	NO _x		BSFC		PM		г/кВт·ч	Δ %
	г/кВт·ч	Δ %	г/кВт·ч	Δ %	мг/м ³	Δ %		
A	14,0	—	175	—	0,69	—	173	—
E	8,0	-43	172	-2	0,67	-3	168	-3
F	5,6	-60	175	0	1,07	55	171	-1
G	5,6	-60	182	4	3,76	446	178	3
H	5,5	-61	186	6	7,22	948	180	4
I	3,5	-75	176	0	0,26	-62	171	-1
K	2,3	-84	—	—	—	—	—	—

лах открытия впускного клапана, однако выбросы частиц на малых и на полной нагрузке при этом возрастают, превосходя допустимые пределы. Выбросы NO_x снижаются до 5,6 г/кВт·ч, как и в случае «Миллер-63» с высокой интенсивностью впрыска, но возрастает до уровня, свойственного конфигурации «В» (стандартный угол открытия впускного клапана + сниженная интенсивность впрыска). Выбросы частиц при этом оказываются выше, чем в конфигурации «В».

В условиях «Миллер-63» влияние интенсивности впрыска на образование NO_x незначительно, но выбросы BSFC и особенно PM резко возрастают. Эти тенденции, а также соответствующие изменения параметров двигателя, таких как температура отработавших газов и коэффициент избытка воздуха, показывают возможные пределы усиления эффекта Миллера при данных условиях.

Взяв за основу конфигурацию «G» («Miller-55» + давление на выходе первой ступени впрыска 100 бар) были проведены опыты с подачей водотопливной эмульсии (Fuel-Water Emulsion — FWE) в цилиндры.

Приготовление эмульсии выполнялось непосредственно перед подачей в двигатель, с использованием системы Aqua Fuel (ранее известной как система HDC), разработанной FMC (рис. 8).

Топливо постоянно циркулирует между смесительной камерой и системой впрыска. Впрыск воды в смесительную камеру осуществляется по сигналу датчика содержания воды в топливе, под управлением микропроцессорной системы, включенной в замкнутый контур регулирования.

Относительное содержание воды в топливе может регулироваться в пределах от 0 до 50 %. Из-за ограничений, связанных с низким давлением после первой ступени системы впрыска, испытания проводились при нагрузке, равной 75% от номинальной. Содержание воды в топливе задавалось на уровне 25 % (рис. 9).

Выбросы NO_x были снижены до 3,6 г/кВт·ч, что на 38 % ниже, чем в режиме «G». Выбросы PM снизились на 90 %, расход топлива BSFC — на 3 %.

Данный тест в целом еще раз подтверждает эффективность использования водотопливной эмульсии при экстремальном цикле Миллера — факт, широко известный по ряду других применений, и позволяет экстраполировать полученные результаты на другие значения нагрузок и содержания воды в топливе.

Если взять за исходный вариант конфигурацию «G» («Миллер-55» + давление после первой ступени впрыска 100 бар), то чтобы достичь уровня требований IMO Tier 3 по выбросам NO_x (2,5 г/кВт·ч), их нужно снизить на 60 %. Как показывает экстраполяция результатов опи-

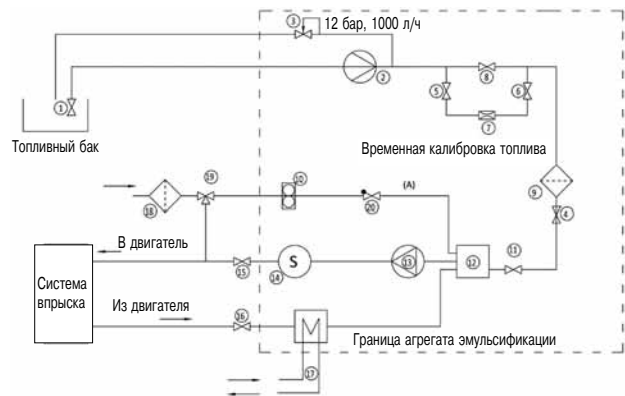


Рис. 8. Система эмульсификации Aqua Fuel:

1 — всасывающий клапан; 2 — водяной насос M2; 3 — редуцирующий клапан 10–12 бар; 4, 20 — обратный клапан; 5, 6, 8, 15, 16 — шариковый клапан; 7 — ротаметр (временный); 9 — водяной фильтр; 10 — расходомер; 11 — клапан впрыска воды; 12 — смеситель; 13 — циркуляционный насос эмульсии; 14 — датчик воды; 17 — теплообменник для топлива; 18 — топливный фильтр (двигатель); 19 — шариковый клапан 2/3

санного выше теста, для этого необходимо обеспечить содержание воды в топливе на уровне 40 %. Данная цифра подтверждается результатами многих аналогичных испытаний.

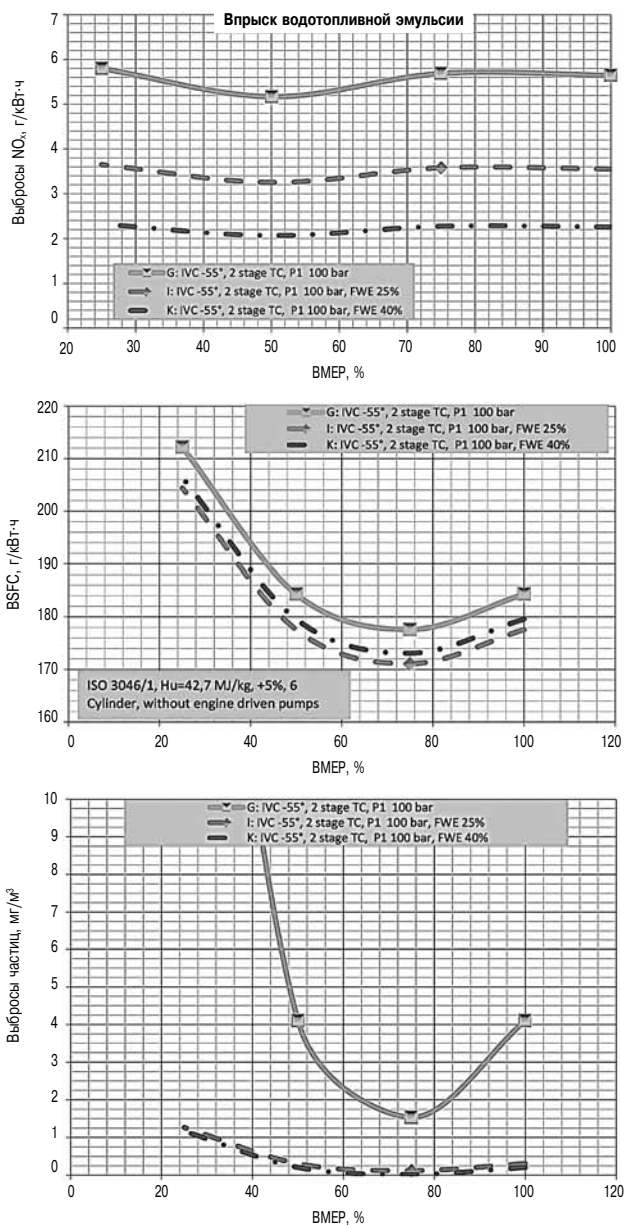


Рис. 9. Влияние водотопливной эмульсии на процесс в условиях экстремального цикла Миллера

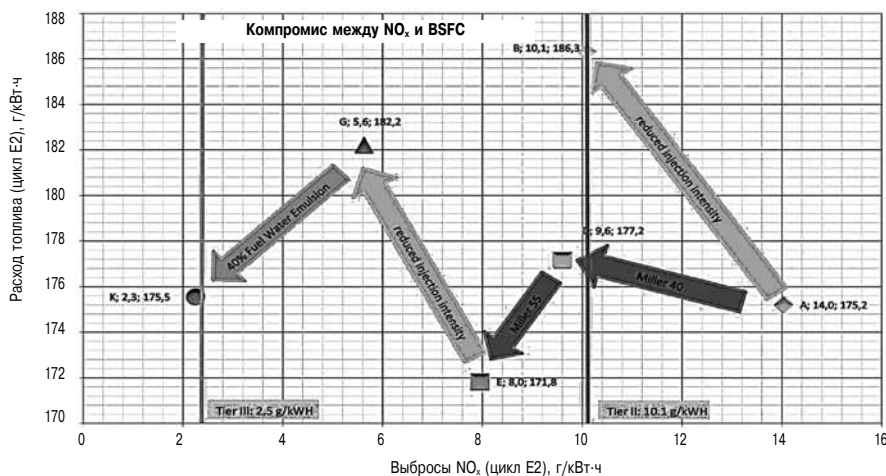


Рис. 10. Оптимизация двигателя для нормативов IMO Tier 2 и IMO Tier 3

ВЫВОДЫ

Проведенные экспериментально такие конструктивные мероприятия как:

- увеличение угла открытия впускного клапана для реализации экстремального цикла Миллера;
- двухступенчатый турбонаддув;
- двухступенчатая система впрыска топлива высокого давления;
- использование водотопливной эмульсии в сочетании с оптимизацией конструктивных параметров двигателя открывают новые возможности для выполнения требований IMO Tier 3 для зон регулируемых выбросов.

Двухступенчатый турбонаддув в сочетании с углом открытия впускного клапана 55° ПКВ до НМТ и оптимизацией давления впрыска является простейшим способом достижения нормативов IMO Tier 2, а также снижения удельного расхода топлива (BSFC), CO₂ и РМ («невидимый дым»), без сколько-нибудь значительных изменений в конструкции двигателя и без использования системы газоочистки. При этом не возникает никаких ограничений для использования тяжелого топлива (рис. 10).

При нахождении судна в изменяется настройка топливной системы пределах зон регулируемых выбросов (ЕСА) (снижение интенсивности впрыска) и включается система подачи водотопливной эмульсии, что обеспечивает соответствие двигателя нормативам IMO Tier 3 при незначительном увеличении BSFC и CO₂. Выбросы частиц остаются на чрезвычайно низком уровне благодаря использованию водотопливной эмульсии. При этом не налагается никаких ограничений на использование тяжелого топлива при условии, что остается возможность перехода на малосернистое топливо. Предлагаемая технология снижения выбросов NO_x исключает необходимость в дополнительных конструктивных мероприятиях, таких как EGR или SCR, органичивающих возможность использования тяжелого топлива и к тому же усложняющих эксплуатацию и обслуживание двигателя.

Для полной проверки возможностей обсуждаемой технологии необходимо усовершенствовать систему впрыска так, чтобы она могла справиться с увеличением цикловых подач при переходе на водотопливную эмульсию.

Кроме того, потребуется изменение конструкции системы наддува, в том числе с учетом работы на малых нагрузках.

УДК 621.431

Чайнов Н.Д., Руссинковский С.Ю. Расчет согласованных стационарных полей температур узла крышка цилиндра–клапаны двигателя внутреннего сгорания // Двигателестроение. — 2014. — № 2. — С. 3–7.

Ключевые слова: дизели, метод конечных элементов, головка цилиндра, клапаны и седла, теплообмен, согласованные граничные условия, математическое моделирование, 2D и 3D температурные поля.

Представлены основные положения методики математического моделирования согласованных граничных условий для расчета температурных полей, полей деформаций и напряжений элементов ЦПГ (головка цилиндра–клапаны). Приведены описание программы и результаты расчета 2D и 3D температурных полей с ее использованием.

Ил. 6. Библ. 6.

УДК 621.43

Абызов О.В., Галышев Ю.В., Шабанов А.Ю. Численное исследование гидродинамики и теплообмена в полости охлаждения головки цилиндра дизеля // Двигателестроение. — 2014. — № 2. — С. 8–10.

Ключевые слова: дизели, головка цилиндра, полость охлаждения, теплообмен, численное моделирование температурного поля.

Предложен метод численного моделирования процессов гидродинамики и теплообмена в полостях охлаждения головки цилиндров форсированного дизеля. Приведены результаты расчета полей температур в головке цилиндров и охлаждающей жидкости в полости охлаждения четырехтактного дизеля размерности $D/S = 15/17,5$. Ил. 5. Библ. 9.

УДК 621.434.038

Тер-Мкртчян Г.Г., Мазинг М.В. Особенности аккумуляторных топливных систем дизелей большой цилиндровой мощности // Двигателестроение. — 2014. — № 2. — С. 11–15.

Ключевые слова: дизели, вредные выбросы, топливная аппаратура, аккумуляторная топливная система, унифицированные платформы, встроенный аккумулятор, форсунка.

Выполнен анализ развития конструкций аккумуляторных топливных систем фирм «Bosch», «L'Orange» и «Duar». Приведены примеры разработки унифицированных платформ с изменяемыми размерами и числом насосных секций для топливных систем судовых и промышленных дизелей.

Ил. 6. Библ. 6.

УДК 621.43.052

Ципленкин Г.Е., Иовлев В.И. Улучшение топливной экономичности двигателей за счет оптимизации систем наддува // Двигателестроение. — 2014. — № 2. — С. 16–22.

Ключевые слова: турбокомпрессор, характеристики наддува, топливная экономичность, частичные нагрузки.

Выполнен обзор и анализ развития конструкций современных турбокомпрессоров фирм «Mitsubishi», «MAN Diesel Turbo», «ABB», «Honeywell». Показано, что за счет оптимизации параметров наддува при работе двигателей на частичных нагрузках достигается снижение расхода топлива на 2–4 %. Ил. 26. Библ. 11.

УДК 621.43.052

Смирнов А.В. Перспективный тип опор турбокомпрессоров ДВС // Двигателестроение. — 2014. — № 2. — С. 23–25.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, турбокомпрессор, подшипниковый узел, причины отказов, газоманнитные опоры.

Выполнен анализ конструкции и причин отказов традиционных опор качения и скольжения ротора турбокомпрессоров. Показаны преимущества перспективных бесконтактных опор — комбинированных газоманнитных подшипников. Библ. 9.

УДК 621.43: 631.372: 681.518.3

Савченко О.Ф., Альт В.В., Добролюбов И.П., Ольшевский С.Н. Развитие средств автоматизации измерений и анализа рабочих процессов при испытаниях ДВС // Двигателестроение. — 2014. — № 2. — С. 26–31.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, диагностирование, техническое состояние, быстропротекающие процессы, индикаторные диаграммы, датчики давления, технология виртуальных приборов.

Приведены результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по развитию средств регистрации (индицирования) и анализа рабочих процессов ДВС. Дано описание экспертной системы на основе виртуальных и интеллектуальных технологий.

Ил. 9. Библ. 17.

УДК 621.899

Остриков В.В., Зимин А.Г., Попов С.Ю., Сафонов В.В. Многофункциональная добавка к моторным маслам // Двигателестроение. — 2014. — № 2. — С. 32–34.

Ключевые слова: двигатель, моторное масло, продукты старения, ремонтно-восстановительный состав, смазочная композиция.

Приведены результаты исследований по расширению функциональных возможностей ремонтно-восстановительных составов. Предложено новое технологическое решение и смазочная композиция, обеспечивающие повышение восстановительного эффекта, улучшение противоизносных свойств и степени чистоты работающего в двигателе моторного масла.

Табл. 6. Ил. 1. Библ. 5.

УДК 622.684:574.001.25

Красножон П.А., Янчеленко В.А. Оценка влияния экологически безопасных охлаждающих жидкостей на надежность автомобильных двигателей // Двигателестроение. — 2014. — № 2. — С. 35–37.

Ключевые слова: незамерзающие охлаждающие жидкости, кавитационные разрушения деталей двигателей, надежность и ресурс.

Рассмотрены вопросы влияния на надежность и ресурс двигателей экологически безопасных охлаждающих жидкостей. Проведены лабораторные испытания кавитационных и эрозионных разрушений деталей двигателей из чугуна, алюминия, азотированных, хромированных и чистых сталей при контакте с различными жидкостями в условиях высоких температур. Табл. 3. Ил. 1. Библ. 2.

УДК 621.43

Перспективные технологии снижения выбросов NO_x судовых дизелей (материалы конгресса CIMAC 2013) // Двигателестроение. — 2014. — № 2. — С. 38–54.

Ключевые слова: дизели, выбросы NO_x , полимерные мембраны, снижение концентрации кислорода, увлажнение воздуха, экстремальный цикл Миллера, двухступенчатый наддув, водотопливная эмульсия.

Известные промышленно освоенные технологии снижения выбросов NO_x судовых дизелей такие как SCR- NH_3 и EGR обладают рядом серьезных недостатков, поэтому все большее внимание уделяется развитию альтернативных технологий. Использование полимерных мембран с селективной проницаемостью для изменения состава воздуха на впуске обеспечивает снижение выбросов NO_x . Наиболее эффективно одновременное снижение концентрации кислорода и увлажнение воздушного заряда. Рассмотрены возможности снижения выбросов NO_x за счет применения экстремального цикла Миллера. Показано, что требования IMO Tier 3 могут быть выполнены при следующих условиях: наличие двухступенчатого турбонаддува, регулируемой системы импульсного впрыска топлива, использования водотопливной эмульсии. Табл. 10. Ил. 29. Библ. 12.

UDC 621.431

Chainov N.D. and Roussinkovsky S.Yu. Analysis of Stationary Thermal Fields in Cylinder Heads & Valves

// Dvigatelistroyeniye. — 2014. — № 2. — P. 3–7.

Keywords: diesel engine, finite element method, valves and seats, heat exchange, consistent boundary conditions, mathematical simulation, 2D- & 3D-thermal fields. The article discusses the essentials of simulation-based analyses of thermal, strain and stress fields in cylinder heads & valves. The description of simulation code elaborated by these authors is added with the results of 2D- & 3D-thermal field analyses.

6 ill., 6 ref.

UDC 621.43

Abyzov O.V., Galyshev Yu.V. and Shabanov A.Yu. Mathematical Analysis of Hydrodynamic and Heat Exchange Processes in Diesel Engine Cylinder Head // Dvigatelistroyeniye. — 2014. — № 2. — P. 8–10.

Keywords: diesel engine, cylinder head, coolant cavities, thermal field numerical simulation.

A method is offered for numerical simulation of hydrodynamic and heat exchange processes in cylinder head of a high-powered diesel engine. Presented are calculated thermal fields in cylinder head and coolant circulating therein for 4-stroke engine with bore/stroke ratio $D/S = 15/17,5$.

5 ill., 9 ref.

UDC 621.434.038

Ter-Mkrtychyan G.G. and Mazing M.V. Accumulator-based Fuel Supply Systems for High Cylinder Output Engines // Dvigatelistroyeniye. — 2014. — № 2. — P. 11–15.

Keywords: diesel engine, emissions, fuel supply systems, accumulator-based fuel supply systems, modular solutions, built-in accumulator, injector.

Accumulator-based fuel supply systems from various manufacturers (Bosch, L'Orange and Duap) are reviewed. The article provides examples of modular solutions for fuel supply systems of industrial and marine diesel engines, differing in size and number of injection units.

6 ill., 6 ref.

UDC 621.43.052

Tsyplenkin G.E and Iovlev V.I. Turbocharging System Optimization as a Means to Improve Engine Fuel Efficiency // Dvigatelistroyeniye. — 2014. — № 2. — P. 16–22.

Keywords: turbocharger, turbocharging system performance, fuel efficiency, partial loads.

The article offers a survey of modern turbochargers from «Mitsubishi», «MAN Diesel Turbo», ABB, and «Honeywell». According to the survey, engine fuel efficiency at partial loads may be improved by 2–4 % due to turbocharging system optimization.

26 ill., 11 ref.

UDC 621.43.052

Smirnov A.V. New Type of Turbocharger Bearing Support // Dvigatelistroyeniye. — 2014. — № 2. — P. 23–25.

Keywords: internal combustion engine, turbocharger, bearing unit, support, failure causes.

Conventional types of turbocharger bearing supports (i. e., rolling and plain bearings) were examined for most likely causes of failure. Non-contacting bearing supports,

viz., combined gas/magnetic bearings, are shown as the most promising solution. 9 ref.

UDC 621.43: 631.372: 681.518.3

Savchenko O.F., Alt V.V., Dobrolyubov I.P. and Olshevsky S.N. Instrumentation and Means of Automatic Combustion Analysis for Diesel Engine Test Facilities // Dvigatelistroyeniye. — 2014. — № 2. — P. 26–31.

Keywords: internal combustion engine, diagnostics, availability, fast processes, indicator diagram, pressure gauge, virtual instrument technology.

The article presents R&D results in the field of combustion process registration (indication) and analysis. Presented is an expert system based on virtual and intellectual technologies. 9 ill., 17 ref.

UDC 621.899

Ostrikov V.V., Zimin A.G., Popov S.Yu. and Safonov V.V. Multi-Functional Additive for Engine Oils // Dvigatelistroyeniye. — 2014. — № 2. — P. 32–34.

Keywords: engine, engine oil, oil ageing products, recondition compound, lube compound.

The article presents the results of a research targeted at an improvement of oil recondition compound performance. New lube concept is offered to facilitate oil recondition and enhance oil lubrication capacity & cleanness.

1 ill., 6 tables, 5 ref.

UDC 622.684:574.001.25

Krasnozhon P.A. and Yanchelenko V.A. Influence of Environmentally-Sound Coolants on Car Engine Reliability // Dvigatelistroyeniye. — 2014. — № 2. — P. 35–37.

Keywords: non-freezing coolants, cavitation-related failures of engine parts, reliability and service life.

The article discusses the influence of environmentally-sound coolants on car engine reliability. Engine parts made from cast iron, aluminum, chromized and carbon steels were tested for cavitation- and erosion-related failures when exposed to hot coolants of various compositions.

1 ill., 3 tables, 2 ref.

UDC 621.43

Promissory Technologies to Improve Marine Engine NO_x Performance (based on CIMAC 2013 papers) // Dvigatelistroyeniye. — 2014. — № 2. — P. 38–54.

Keywords: diesel engines, NO_x emissions, polymeric membranes, oxygen reduction, scavenge air moisturizing, water emulsion fuel, extreme Miller cycle, two stage turbo charging.

A number of shortcomings inherent in known commercially available technologies of reducing NO_x emission from marine engines, such as SCR-NH₃ and EGR, provide an incentive to look for alternative methods. One of such methods is based on use of polymer membrane which is selectively permeable to oxygen and water vapor. Combination of the oxygen density reduction and air moisturizing proved to be the most efficient from NO_x reduction viewpoint. Also, extreme Miller cycle was considered as a means to achieve Tier 3 compliant NO_x emission levels. The following features are shown as sufficient to meet IMO Tier 3 specifications: two-stage turbocharging, electronically controlled fuel injection system, use of water emulsion fuel. 29 ill., 10 tables, 12 ref.