

## ВОЗДЕЙСТВИЕ НА СИСТЕМУ НАДДУВА ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ТРЕБОВАНИЙ ИМО III

Г.Е. Ципленкин, к.т.н., В.И. Иовлев, к.т.н., Сухарев А. Н., инж.  
ООО «ТУРБОКОМ»

Правило 13.4 Приложения VI к МК МАРПОЛ 73/78 (далее ИМО III) предписывают сократить удельную эмиссию  $\text{NO}_x$  судовых дизелей примерно на 80 % по сравнению с ИМО I. Выполнение этого требования возможно за счет применения технологии селективного каталитического восстановления (SCR) или комплекса внутренних мероприятий в системе двигатель–турбокомпрессор, к которым, в первую очередь, относится рециркуляция отработавших газов (EGR). Установка SCR перед турбиной (двухтактные двигатели и двухступенчатые системы наддува) и применение EGR предполагает наличие регулируемой системы наддува, которая в одних случаях обеспечивает низкую эмиссию  $\text{NO}_x$ , а в других — высокую топливную экономичность.

Технологии снижения выбросов  $\text{NO}_x$  разделяются на внешние и внутренние. Внешние уменьшают выбросы  $\text{NO}_x$  за счет каталитической очистки, в то время как внутренние подавляют образование  $\text{NO}_x$  в процессе сгорания.

В соответствии с требованиями ИМО II (действует с 01.01.2011) эмиссия  $\text{NO}_x$  должна быть уменьшена примерно на 20 %. Это может быть достигнуто небольшими изменениями в конструкции и системах двигателя.

Требования ИМО III (действует с 01.01.2011) могут быть выполнены либо при использовании внешних технологий, либо за счет комбинации внутренних технологий. В докладе анализируются возможности снижения эмиссии  $\text{NO}_x$  на базе моделирования работы систем селективного каталитического восстановления (SCR) и рециркуляции отработавших газов (EGR).

### Селективное каталитическое восстановление

SCR — отработанная технология очистки ОГ, которая позволяет на любом двигателе выполнить требование правила ИМО III (90 %-ное сокращение  $\text{NO}_x$ ). Система SCR разрабатывается с учетом температуры ОГ и содержания серы в топливе. Обычные реакторы SCR работают лучше всего в температурном диапазоне от 300 до 450 °С. В этом диапазоне мочевины хорошо разлагается и не требуются специальные высоко- или низкотемпературные компоненты.

Существенное влияние на работу системы SCR оказывают соединения серы. Аммиак в реакции с трехокисью серы образует бисульфат аммония — клейкое вещество, которое при пониженных температурах покрывает поверхность катализатора, снижает его эффективность и может привести к выходу реактора из строя. В связи с этим SCR размещается в зоне, где температура ОГ выше предела формирования бисульфита аммония.

Температура на выходе из турбины среднеоборотного двигателя (СОД) с двухступенчатой системой наддува и малооборотного двигателя (МОД) слишком низка, поэтому SCR устанавливается перед турбиной.

Реактор SCR, установленный после турбокомпрессора (ТК), создает некоторое противодавление, но оказывает слабое воздействие на работу двигателя на установившемся режиме. Установка SCR перед турбиной сильно влияет на качество переходных процессов двигателя.

### Двухтактный двигатель с одноступенчатой системой наддува

Инерционность реактора вызывает колебания температуры выпуска, частоты вращения ТК, давления наддува и может вызвать остановку двигателя из-за недостаточной продувки.

Исследования, проведенные на двухтактном судовом двигателе с SCR перед турбиной, показали:

➤ При постоянной нагрузке в реальных условиях небольшие изменения температуры выпуска могут вызвать незначительные колебания частоты вращения ТК. В зависимости от режима работы они могут быть подавлены или усилены. При нагрузке 70 % система наддува сохраняет свою устойчивость. При 50 %-ной нагрузке искусственный вывод ее из равновесия охлаждением газа в турбине на 2 °С в течение нескольких секунд приводит к усилению вынужденных колебаний из-за недостаточной продувки и роста тепловой нагрузки двигателя.

➤ При ступенчатом увеличении нагрузки с 50 до 70 % тепловая нагрузка двигателя стремительно увеличивается и вызывает большие колебания параметров, но они демпфируются и система при 70 %-ной нагрузке приходит в устойчивое состояние. Однако при более низких нагрузках ста-

билизация не наблюдается и колебания усиливаются. Объем SCR оказывает решающее воздействие на развитие переходного процесса. Уменьшение объема SCR сокращает период и снижает амплитуду колебаний. Постоянная объема SCR должна быть меньше времени, требуемого для изменения нагрузки, но в настоящее время снижение объема SCR невозможно.

Для надежной работы двухтактных судовых двигателей с реактором SCR перед турбиной и устранения колебания параметров требуется регулируемая система наддува. Были исследованы два возможных способа управления (рис. 1):

А) комбинация сброса воздуха (СВ) с перепуском газа в обход SCR (байпас);

Б) регулируемая турбина (РТ).

Для варианта (А) байпас и СВ работают по следующему алгоритму.

*Случай 1:* SCR охлаждает ОГ. Так как давление наддува слишком низкое, то байпас открыт, что увеличивает теплосодержание газов на выходе из двигателя и входе в турбину.

*Случай 2:* SCR нагревает ОГ. Так как давление наддува слишком высокое, то клапан сброса воздуха из компрессора открыт, что препятствует дальнейшему повышению давления.

Система SCR с байпасом и сбросом воздуха позволяет эффективно демпфировать колебания и обеспечить устойчивую работу двигателя за очень короткое время (рис. 2).

Но при этом часть ОГ обходит реактор SCR, и содержание  $\text{NO}_x$  в них не может быть уменьшено. Это неприемлемо при работе в гавани, где при маневрировании судна нагрузка быстро изменяется и одновременно требуется низкая эмиссия.

В варианте (Б) используется регулируемая турбина для управления давлением наддува. Регулируемая турбина в состоянии демпфировать колебания и гарантирует безопасную работу двигателя (см. рис. 2), поскольку поток ОГ полностью проходит через SCR, что обеспечивает номинальное снижение  $\text{NO}_x$  даже при быстром

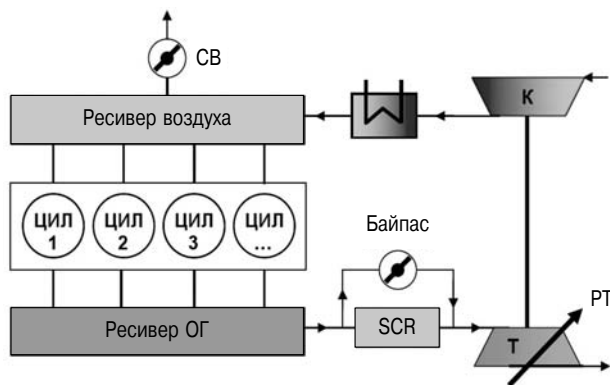


Рис. 1. Схема управления системой наддува

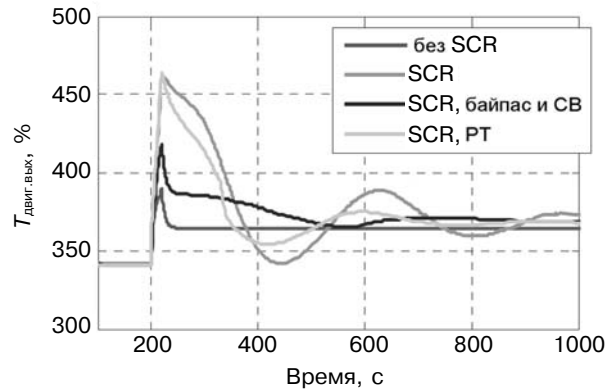


Рис. 2. Температура на выходе из двигателя при ступенчатом повышении нагрузки с 50 до 70 %

изменении нагрузки. Но так как SCR охлаждает ОГ, то невозможно увеличить температуру на входе в турбину, и в деталях двигателя возникают высокие тепловые нагрузки из-за недостаточной продувки. Поэтому в варианте с регулируемой турбиной необходима дополнительная энергия для обеспечения продувки, особенно при работе на частичных режимах. Улучшить продувку возможно за счет использования большего размера вспомогательных воздуходувок, работающих в диапазоне до 50–60 %-ной нагрузки, или за счет установки дополнительной камеры сгорания для увеличения температуры на входе в турбину.

#### Четырехтактный двигатель с двухступенчатым наддувом

Для четырехтактного двигателя с двухступенчатым наддувом оптимальная температура для работы реактора SCR достигается между турбинами первой и второй ступени (рис. 3).

Для исследования воздействия на работу двигателя SCR, установленного между двумя турбинами было выполнено моделирование с повышением нагрузки двигателя от 33 до 66 % и ее снижением от 66 до 33 % (рис. 4, 5).

Реактор SCR оказывает воздействие на переходный процесс двигателя подобно фильтру малой пропускной способности с задержкой изменения температуры перед турбиной низкого давления. Колебания демпфируются при любой

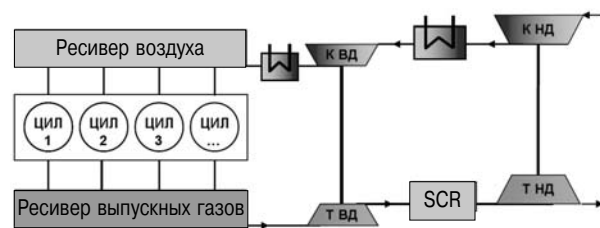
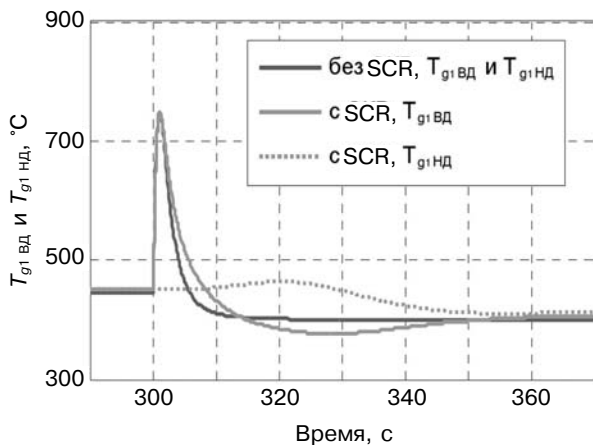
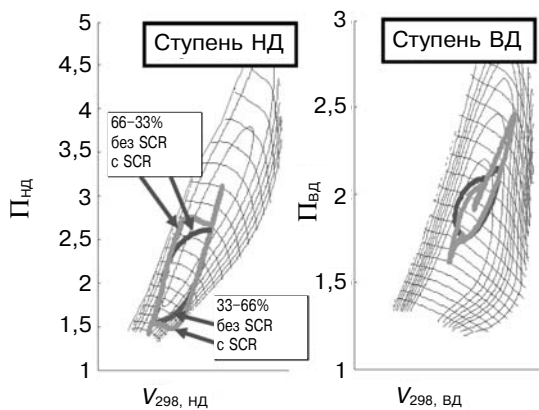


Рис. 3. Схема двухступенчатой системы наддува с SCR между турбинами высокого и низкого давления



**Рис. 4.** Ступенчатое повышение нагрузки от 33 до 66 %. Сравнение температур на входе/выходе из реактора при работе с SCR и без него



**Рис. 5.** Работа компрессора при ступенчатом повышении нагрузки от 33 до 66 % и при ее снижении от 66 до 33 %

нагрузке, и SCR не влияет на значение коэффициента избытка воздуха для сгорания.

При повышении нагрузки и ее снижении компрессор низкого давления работает ближе к линии помпажа (рис. 5), поэтому в зависимости от размера SCR, запаса от границы помпажа, времени отклика на падение нагрузки и ширины характеристики компрессора может потребоваться байпас.

#### Рециркуляция отработавших газов (EGR)

Система EGR оказывает непосредственное влияние на конструкцию двигателя и технические требования к системе наддува. Рециркуляция ОГ может быть внешней или внутренней.

Внутренняя рециркуляция достигается ранним закрытием выпускного клапана, что позволяет часть ОГ оставить в цилиндре. Однако из-за повышения температуры заряда возможности уменьшения эмиссии  $NO_x$  составляют около 20 %.

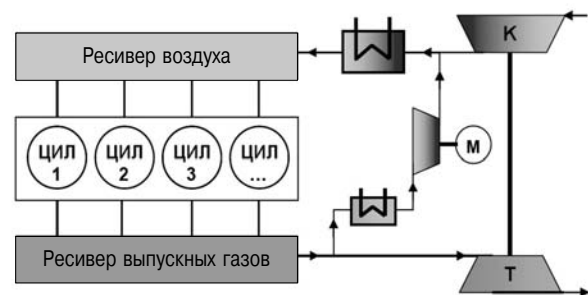
Внешняя рециркуляция выполняется вне цилиндра. Поэтому ОГ могут быть охлаждены, и возможности снижения эмиссии  $NO_x$  более высокие. Внешняя система EGR может быть раз-

делена на рециркуляцию низкого (НД) и высокого давления (ВД).

Система EGR низкого давления работает при атмосферном давлении. Процессом несложно управлять, но элементы системы (охладители и компрессоры) должны быть выполнены с учетом работы в среде ОГ. Кроме того, КПД системы в целом может быть ниже из-за более высокой удельной работы компрессора при более высокой температуре на входе и вследствие загрязнения его проточной части.

Система EGR высокого давления осуществляет рециркуляцию ОГ при давлении наддува. Ее влияние на КПД системы наддува незначительное, но система требует наличие устройства для подачи ОГ в ресивер воздуха.

Имеются несколько вариантов подачи ОГ из выпускного ресивера во всасывающий коллектор, но в докладе подробно рассматриваются только вариант с дополнительным нагнетателем и электрическим приводом (НГ) (рис. 6).



**Рис. 6.** Схема рециркуляции отработавших газов с EGR-нагнетателем

Дополнительный нагнетатель для подачи газа применим только для высокооборотных двигателей (ВОД) небольшого размера. Для МОД и СОД эта система становится неэффективной из-за мощного электропривода и сильного влияния на топливную экономичность.

#### Двухтактный двигатель с одноступенчатой системой наддува

Сопоставление вариантов привода дополнительного нагнетателя на двухтактном двигателе с одноступенчатой системой наддува со степенью рециркуляции примерно 30 % показало, что повышение удельного расхода топлива на 2 % достигается в случае применения привода от дополнительной турбины и на 3 % в случае применения электропривода.

При работе с системой EGR высокого давления расход воздуха и газа через основной ТК уменьшается. Для рассматриваемого варианта площадь турбины и расход воздуха через компрессор ниже примерно на 30 % по сравнению с вариантом без EGR (рис. 7).

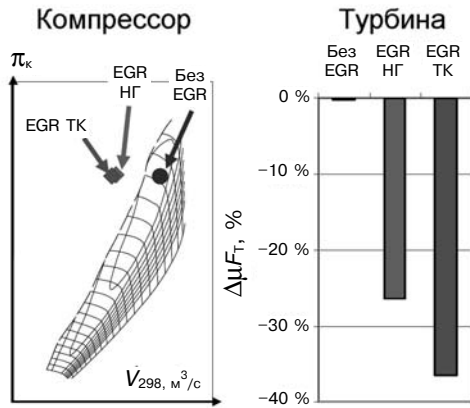


Рис. 7. Уменьшение размеров проточных частей ТК для различных вариантов EGR высокого давления

Работа с отключенной EGR с ТК, имеющим пропускную способность на 30 % меньше, невозможна, так как без регулирования чрезмерно увеличится давление наддува. Перепуск ОГ не решает проблемы, так как для рассматриваемого случая тепловая нагрузка на детали камеры сгорания двигателя чрезмерно увеличивается.

Регулируемая турбина — наиболее оптимальное решение, однако, подобно варианту с перепуском ОГ, система способна гарантировать удовлетворительную работу с заданной степенью рециркуляции ОГ.

В этом случае имеется возможность использовать параллельный наддув дополнительным ТК, который компенсирует снижение пропускной способности основной турбины на 30 %. При этом двигатель выполнит требования IMO II, но система наддува с EGR получается очень сложной.

#### Четырехтактный двигатель с двухступенчатой системой наддува

Для четырехтактных СОД и ВОД требуется более низкая степень рециркуляции ОГ. Для выполнения требований IMO III была принята степень рециркуляции ОГ 20 % и рециркулируемый момент подачи топлива для управления максимальным давлением сгорания. Для обеспечения при рециркуляции ОГ требуемого коэффициента избытка воздуха для сгорания использовалось изменение момента открытия впускного клапана.

Были исследованы два возможных варианта комплектации системы наддува (рис. 8):

А. ТК с параметрами, обеспечивающими работу с отключенной системой EGR и перепуском воздуха на двигателе для работы с включенной системой EGR.

Б. ТК с параметрами, обеспечивающими работу с включенной системой EGR (требуется ТК меньшего размера) и перепуском воздуха на турбине высокого давления для работы с выключенной системой EGR.

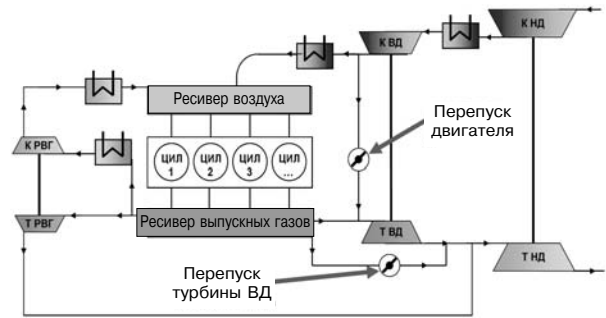


Рис. 8. Схема двухступенчатой системы наддува с EGR

Если ТК были выбраны для варианта (А), они будут иметь слишком большую производительность при работе с включенной системой EGR. С открытым перепуском на двигателе при включенной EGR расход воздуха через ТК увеличивается. Рабочие точки на характеристиках смещаются от помпажа в зону более высоких КПД, как показано на рис. 9.

Если ТК были выбраны для варианта (Б), то они будут иметь недостаточную производительность при работе с включенной EGR. Перепуск на турбине высокого давления открывается для работы с отключенной системой EGR. Это увеличивает степень повышения давления в компрессоре низкого давления и смещает рабочие

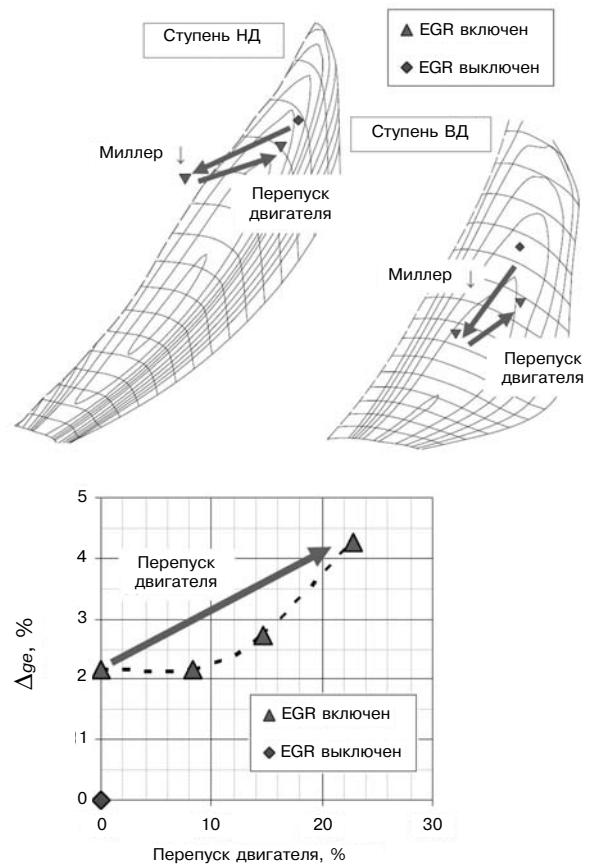
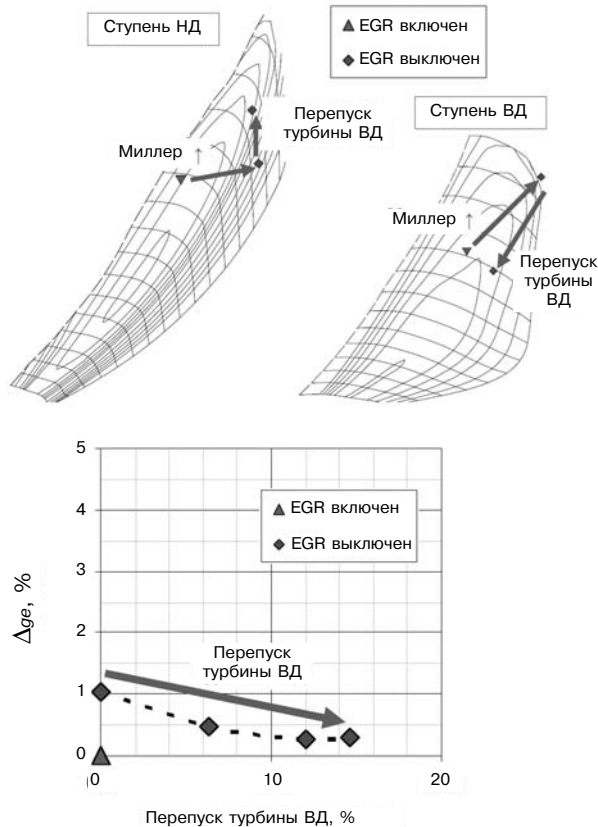
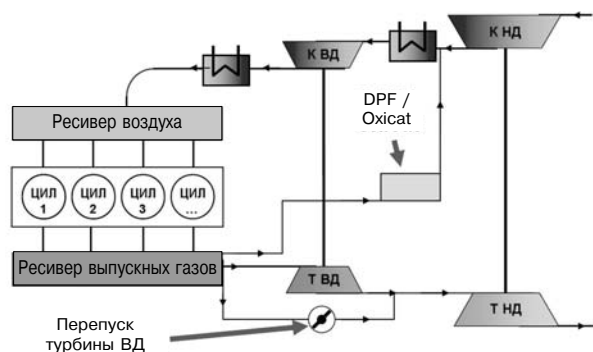


Рис. 9. Работа компрессора с включенной EGR и перепуском воздуха на двигателе



**Рис. 10. Работа компрессора с выключенной EGR и перепуском газа на турбине высокого давления**



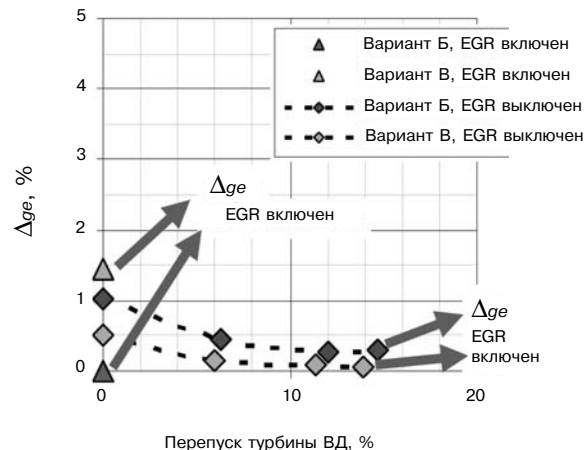
**Рис. 11. Схема системы EGR без насоса EGR**

точки в зону безопасной работы и хорошего КПД (рис. 10).

Рабочие точки на рис. 9 и 10 соответствуют максимальным значениям перепуска в соответствующем варианте.

Согласно результатам моделирования расход топлива в соответствующих расчетных точках для вариантов А и Б тот же самый. Однако, когда EGR включается, расход топлива для варианта А с перепуском на двигателе повышается, так как перепускаемый воздух охлаждает ОГ на входе в турбину.

При перепуске ОГ на турбине высокого давления был дополнительно исследован вариант В,



**Рис. 12. Сравнение расхода топлива для вариантов: Система EGR—турбокомпрессор (Б) Система EGR и рециркуляция без насоса (В)**

при котором рециркуляция ОГ осуществлялась путем соединения выпускного ресивера с ресивером воздуха компрессора низкого давления (рис. 11). При задании соответствующего перепада давлений между этими двумя объемами рециркуляция может быть выполнена без дополнительного насоса.

Результаты моделирования показали (рис. 12), что экономичность двигателя в вариантах EGR — выключен (А) незначительно отличается от варианта с EGR — турбокомпрессором и перепуском ОГ на турбину высокого давления (Б).

Незначительное снижение расхода топлива обусловлено увеличением пропускной способности турбины высокого давления. Однако при работе с включенной системой EGR расход топлива повышается примерно на 1,5 %, что связано с потерей давления в линии рециркуляции ОГ. Исполнение компрессора высокого давления, так же как охладителей воздуха, должно предусматривать возможность работы в среде ОГ. Кроме того, увеличивается чувствительность системы наддува из-за загрязнения проточной части компрессора высокого давления и падения его КПД.

### Закключение

Независимо от выбранной технологии для снижения эмиссии NO<sub>x</sub> судовых дизелей до требований ИМО III возникает необходимость значительной модернизации систем наддува, управления двигателем и архитектуры двигателя в целом.

В случае выбора внешней системы каталитической очистки газов в реакторе SCR для обеспечения его работоспособности он должен быть установлен перед турбиной. Значительный объем реактора отрицательно сказывается на качестве переходных процессов, а система наддува при малых нагрузках теряет устойчивость и работает в

режиме автоколебаний. При этом устойчивость системы может быть восстановлена только с помощью перепуска ОГ в обход реактора SCR при значительном снижении эффективности очистки, что неприемлемо. Регулируемая турбина в комбинации с системой SCR работает устойчиво, однако не обеспечивает требуемого качества продувки цилиндра и охлаждения деталей камеры сгорания. В этом варианте требуется дополнительная мощность для качественной продувки с неизбежной потерей экономичности.

При выборе для снижения эмиссии NO<sub>x</sub> системы рециркуляции EGR с регулированием на-

чала подачи топлива и фаз газораспределения существенно усложняется система управления двигателем, а также ухудшаются условия работы системы впуска. Однако в сравнении с SCR экономичность двигателя не снижается, а массогабаритные показатели силовой установки не ухудшаются.

#### Литература

1. Codan E., Bernasconi S., Born H. IMO III Emission Regulation: Impact on the Turbocharging System. Paper № 139, CIMAC 2010, Bergen.



НОВОСТИ ЗАО «ТРАНСМАШХОЛДИНГ»

### ТРАНСМАШХОЛДИНГ ЗАВЕРШИЛ ПОСТАВКУ ПАРТИИ ТЕПЛОВЗОВОВ 2ТЭ116УМ В МОНГОЛИЮ

Луганский тепловозостроительный завод (Украина, входит в состав ЗАО «Трансмашхолдинг») завершил выполнение контракта по поставке 31 тепловоза 2ТЭ116УМ Улан-Баторской железной дороге (Монголия).

Контракт реализован в соответствии с Меморандумом о сотрудничестве в сфере обеспечения парка УБЖД современным высокоэффективным подвижным составом, подписанным между ЗАО «Трансмашхолдинг», ОАО «Российские железные дороги» и АО «Улан-Баторская железная дорога» в 2009 г.

«Заказчик доволен сотрудничеством с Лугансктепловозом», — отметил генеральный директор Лугансктепловоза Сергей Михеев. — «В свою очередь трудовой коллектив завода благодарен Трансмашхолдингу, так как без его поддержки заказ получить было бы не возможно. Мы выполнили его тщательно и в срок».

Напомним, что УБЖД на паритетных началах принадлежит монгольскому и российскому государствам. Со стороны России руководство предприятия осуществляет ОАО РЖД. Парк тягового подвижного состава УБЖД почти полностью состоит из советских и российских тепловозов, построенных в разные годы.



Тепловоз 2ТЭ116УМ — специальная модификация локомотива 2ТЭ116У, наилучшим образом приспособленная к эксплуатации в условиях Монголии (высокая запыленность, высокогорье, значительные перепады температур и т. д.). Тепловозы комплектуются дизель-генераторами 18-9ДГ-01, которые производятся на Коломенском заводе (также входит в состав Трансмашхолдинга).

В холдинге выражают готовность к продолжению сотрудничества с УБЖД и диверсификации поставок железнодорожной техники.

### МЕТРОВАГОНМАШ ИЗГОТОВИЛ ПЕРВЫЙ ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗД ДЛЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ СЕРБИИ

18 июля 2011 г. на подмосковном Метровагонмаше (МВМ, входит в состав ЗАО «Трансмашхолдинг») состоялась презентация первого дизельного поезда ДП-С (дизель-поезд — Сербия), построенного для железных дорог Сербии (Zeleznice Srbije). Всего по контракту, заключенному в 2010 г., будет изготовлено двенадцать дизель-поездов в двухвагонном исполнении, которые будут переданы заказчику в течение двух лет. Дизель-поезд будет использоваться на железных дорогах с европейской рельсовой колеей шириной 1435 мм.

Дизель-поезд соответствует требованиям действующих международных стандартов и европейских норм. Мытищинский дизель-поезд может стать



достойным конкурентом продукции крупных производителей из стран Евросоюза.