

РАЗВИТИЕ СИСТЕМ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО НАДДУВА ДВИГАТЕЛЕЙ

Г.Е. Циплёнкин, к.т.н., В.И. Иовлев, к.т.н., А.А. Коженков, инженер
ООО «Турбоком»

Выполнен обзор и анализ развития систем двухступенчатого наддува (ДСН) четырехтактных и двухтактных двигателей различного применения. Показано, что системы ДСН для четырехтактных и двухтактных двигателей имеют различное конструктивное исполнение и различаются по эффективности воздействия на улучшение рабочих параметров и уровень вредных выбросов. В четырехтактных двигателях с циклом Миллера снижение вредных выбросов NO_x оценивается величиной 40 %, в то время как в двухтактных эффект применения ДСН выражается в снижении расхода топлива на 2–5 г/кВт·ч.

Продолжение. Начало см. №1 (267) 2017

Wartsila 31 — двигатель второго поколения с двухступенчатой системой наддува

При разработке системы ДСН нового двигателя Wartsila 31 был учтен имеющийся опыт улучшения рабочих параметров, в том числе требований ограничения максимального давления сгорания. Компоновка системы ДСН двигателя Wartsila 20V32 принята в качестве стандарта для ДСН 2/2 (два ТК ВД и два ТК НД) для больших V-образных двигателей. Компоновка системы ДСН Wartsila 6L46F принята в качестве стандарта для ДСН 1/1 (один ТК ВД и один ТК НД), т. е. для рядных двигателей и небольших V-образных двигателей. Эти компоновки были применены при проектировании Wartsila 31 с улучшенными условиями обслуживания.

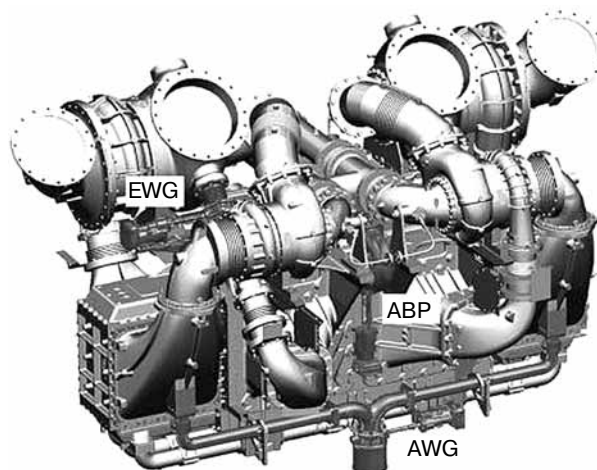
Для управления системой ДСН необходимы следующие подсистемы управления: перепуск ОГ и перепуск воздуха. На рис. 2.10 показано расположение указанных подсистем на двигателе Wartsila 31. Места размещения выбираются с ориентацией на низкий уровень вибрации и ограничения по нагреву материала приводов. Для выполнения требований по ограничению вредных выбросов на двигателе Wartsila 31 необходимо сочетание ДСН и других технологий снижения эмиссии. На практике это приведет к еще большему разнообразию конструкций управляющих систем.

Двигатели Wartsila 31 будут оснащены электрическими исполнительными механизмами вместо пневматических. Электрические приводы позволяют быстрее и точнее контролировать

параметры ДСН как более чувствительную систему в сравнении с ОСН.

Наличие ДСН удваивает количество ТК — основных источников высокочастотного шума на двигателе. В целях снижения шума особое внимание было уделено изоляции. Как на Wartsila 20V32TS, так и на Wartsila 31 воздухопроводы полностью герметичны для оптимального поглощения шума. Опыт, полученный на Wartsila 20V32TS, получил дальнейшее развитие на Wartsila 31. В результате на Wartsila 31 уровень шума системы наддува ниже, чем на его предшественнике двигателе Wartsila 32 с системой ОСН. (рис. 2.11).

Фирмой «Wartsila» создана оптимальная компоновка ДСН для СОД, которая позволяет вы-



Exhaust waste gate (EWG) — перепуск газа
Air by-pass (ABP) — байпас воздуха
Air waste gate (AWG) — перепуск воздуха

Рис. 2.10. Система управления ДСН двигателя Wartsila 31

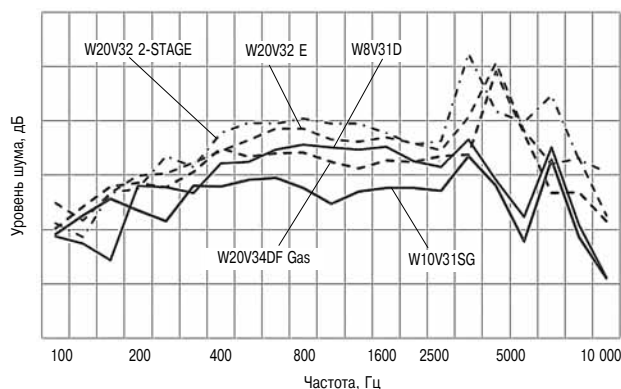


Рис. 2.11. Сравнение уровня шума различных систем наддува

полнять надлежащий контроль динамики двигателя и вибрации, установленных на нем агрегатов. Система ДСН характеризуется большим числом компонентов и массой, что усложняет задачу достижения приемлемой динамики двигателя. По опыту фирмы «Wartsila» применение ДСН увеличивает массу системы наддува в 1,5–1,7 раза по сравнению с ОСН.

На двигателях с постоянной частотой вращения задача обеспечения приемлемой динамики решается сравнительно просто, что снижает количество расчетно-исследовательских работ при их проектировании. Результаты работ по созданию двигателя Wartsila 20V32TS служат хорошим примером, так как его динамика и уровень вибрации были признаны приемлемыми при минимальном количестве выполненных расчетов.

Двигатели с переменной частотой вращения являются более сложными динамическими объектами. Так двигатель Wartsila 31 отличается повышенное давление в цилиндре по сравнению с двигателями, находящимися в производстве, что приводит к возникновению проблем с его динамикой из-за вибрации. Для обеспечения оптимальной динамики двигателя Wartsila 31 были выполнены оптимизация топологии и расчеты собственных частот. В результате двигатель Wartsila 31 по динамике не уступает двигателю Wartsila 32, несмотря на большую присоединенную массу элементов системы наддува.

При проектировании ДСН для двигателей с большим диаметром цилиндра, т. е. размерности класса Wartsila 46, фирма столкнулась с проблемой динамики двигателя. Чем больше диаметр цилиндра двигателя и его мощность, тем сложнее задача увеличения жесткости блока цилиндров и компенсации увеличения присоединенной массы системы наддува. Поэтому работа по машинам этого класса продолжается.

По мере расширения сфер применения двигателей с ДСН фирма создает конструкторские решения по исполнению отдельных элементов системы наддува с целью удобства их обслуживания. Двигатель с ДСН более чувствителен к изменениям состояния системы, в том числе к загрязнению проточной части турбины ТК. Технология промывки турбины водой была оптимизирована при эксплуатации двигателя на буровой установке, работающего на топливе с высокой зольностью. Оптимальный режим работы двигателя W31 обеспечивается автоматизированной системой промывки турбины. Это повысит надежность турбокомпрессора, сводя к минимуму риск появления трещин на корпусе вследствие повышения температуры из-за чрезмерно длинных переходных процессов. Двигатель

Wartsila 31 имеет функцию автоматического контроля температуры во впускном ресивере, чтобы избежать появления конденсата между ступенями компрессора НД и ВД и свести к минимуму вероятность образования конденсата за охладителем.

На основании выполненных разработок два типа двигателей были запущены в производство: Wartsila 32 — в 2014 и наиболее эффективный ряд Wartsila 31, включая дизель (Wartsila 8V31), газовый двигатель (10V31SG) и двигатель двойного топлива (10V31DF) — в 2015.

СИМАС 2016. Двигатель Wartsila 31 — самый эффективный четырехтактный двигатель [16]

Двигатель Wartsila 31 является базовым двигателем, на основе которого выпускаются три модификации: дизель, газовый двигатель (ГД) и двухтопливный двигатель (ДТД). Ряд двигателей покрывает диапазон мощностей от 4500 до 9760 кВт и выпускается в V-образном исполнении для морских судов. В табл. 2.1 представлены основные параметры двигателя Wartsila 31, который является на сегодняшний день самым экономичным двигателем в мире. При работе на тяжелом топливе удельный расход топлива был снижен на 8 г/кВт·ч по сравнению с аналогами и достиг величины 165 г/кВт·ч, что зарегистри-

Таблица 2.1

Основные параметры двигателя Wartsila 31

Параметры дизеля	Дизель		Двойного топлива		Газовый	
Диаметр цилиндра, мм	310		310		310	
Ход поршня, мм	430		430		430	
Частота вращения, об/мин	720	750	720	750	720	750
Цилиндровая мощность, кВт	590	610	530	550	530	550
Число цилиндров						

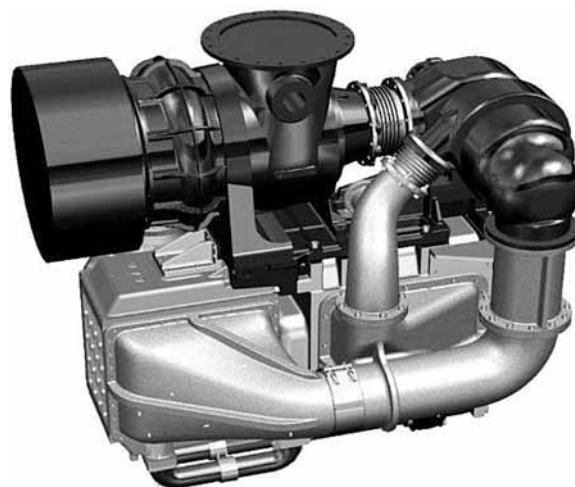


Рис. 2.12. Двухступенчатая система наддува второго поколения

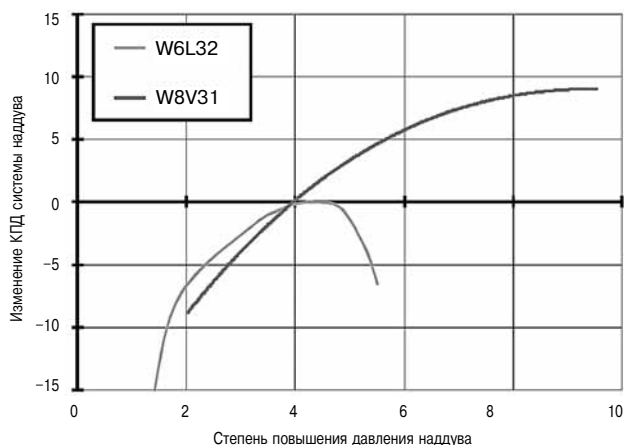


Рис. 2.13. КПД и степень повышения давления при ДСН (Wartsila 31) и ОСН (Wartsila 32)

ровано как мировой рекорд в Книге рекордов Гиннеса.

В дизельном варианте двигатель удовлетворяет требованиям IMO Tier 2 без дополнительной очистки. Для соблюдения IMO Tier 3 требуется технология SCR. Для обеспечения надежной работы двигателя Wartsila 31 используется поддержание и контроль температуры ОГ, оптимальный для работы SCR во всем диапазоне нагрузки.

Полученные результаты были достигнуты за счет использования ДСН второго поколения, цикла Миллера, аккумуляторного впрыска топлива и регулируемых фаз газораспределения.

ДСН второго поколения (рис. 2.12) имеет КПД 75 % и степень повышения давления до 10. Уровень КПД ОСН около 65–70 % (рис. 2.13).

3. «MTU Friedrichshafen GmbH»

СІМАС 2010. Новое поколение двигателей MTU ряда 4000 для железнодорожного транспорта, полностью соответствующих требованиям по выбросам ЕUІВ [17, 18]

Для достижения заданных пределов эмиссии (директива Европейского союза 97/68/EG ступень ІІВ), вступающих в силу в 2012 г., фирма MTU представила рынку новую серию двигателей 4000 R44, соответствующих этим требованиям. Двигатели серии 4000 покрывают диапазон мощностей от 1000 до 3000 кВт и предназначены для применения в дизель-электрических или дизель-гидравлических локомотивах и маневровых тепловозах. Это поколение двигателей разработано на основе выпускаемых модификаций с использованием проверенных технологий. Обеспечение требований ЕС ІІВ достигается за счет управляемой рециркуляцией охлажденных ОГ. Высокий КПД турбокомпрессора и технология «донорский цилиндр», запатентованная MTU [19], минимизирует потери при изменении нагрузки.

Управляемая система ДСН с тремя ТК фирмы MTU (два ТК НД и один ТК ВД с охладителями)

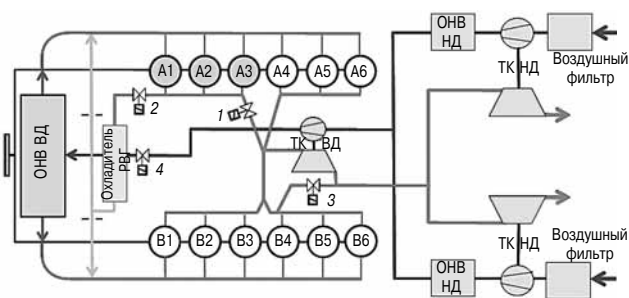


Рис. 3.1. Двигатель с управляемой двухступенчатой системой наддува и рециркуляцией охлажденного отработанного газа:

1 — управление РВГ, 2 — управление РВГ, 3 — управляемый байпас турбины высокого давления, 4 — дроссельный клапан воздуха (управление охлаждением). Сокращения: ОНВ — охладитель наддувочного воздуха, РВГ — рециркуляция выпускных газов, ВД — высокое давление, НД — низкое давление, ТК — турбокомпрессор

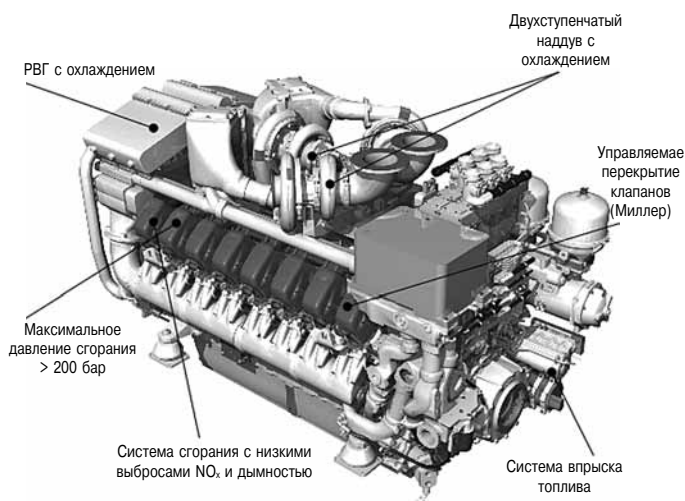


Рис. 3.2. Двигатель фирмы MTU серии 4000 ЕUІВ

обеспечивает хорошее наполнение цилиндров воздухом на всех режимах работы в том числе — при внешних критических условиях по температуре воздуха на входе, разрежению на впуске (работа на высоте) и противодавлению на выпуске (рис. 3.1). Использование цикла Миллера позволяет обеспечить соответствие нормам выбросов NO_x при одновременном снижении расхода топлива.

Все необходимые технологические компоненты были встроены в базовый двигатель с учетом размещения его внутри тепловоза. Размещение компонентов системы на 16-и цилиндровом V-образном двигателе показано на рис. 3.2.

СІМАС 2013.

Двигатели MTU серии 1163-04 [20]

Новое поколение двигателей 1163-04 с диаметром поршня 23 и ходом 28 см в диапазоне мощностей от 6000 до 7400 кВт (p_{me} от 24,8 до 28,8 бар) при частоте вращения коленчатого вала от 1250 до 1325 об/мин представлено по-

Таблица 3.1

Технологии сжигания выбросов MTU

Область применения	Концепция снижения выбросов			
	Система наддува	EGR	SCR	DPF
Внедорожная техника	ДСН	используется		
Железнодорожный транспорт	ДСН	используется		используется
Морской транспорт	РН		используется	
Выработка электроэнергии	ОСН		используется	используется

Таблица 3.2

**Параметры двигателей
серии S4000-05 EPA Tier 4 Внедорожник**

Тип двигателя	Дизель, газовый двигатель	Большегрузный самосвал	Экскаватор
Требование по эмиссии	EPA Tier 4		
Диаметр цилиндра / ход поршня, мм	170/210		
Угол развала	90		
Номинальная частота вращения, об/мин	1900	1800/1900	1800
Номинальная мощность — 12V, кВт	1939	1864	1500
Номинальная мощность — 16V, кВт	2240	2400	—
Номинальная мощность — 20V, кВт	—	3000	—

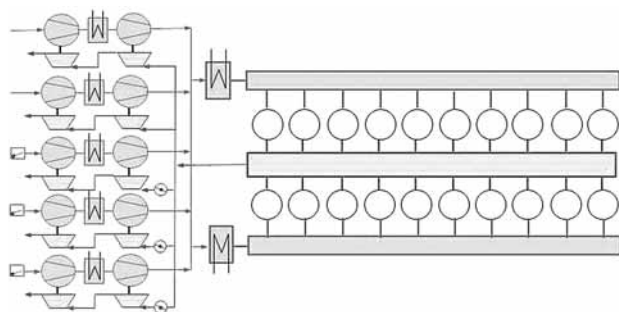


Рис. 3.3. Схема наддува 20-цилиндрового двигателя фирмы MTU серии 1163-04

требителю. Давление наддува увеличено с 4,6 до 5,7 бар, удельный расход топлива снижен на 8 % при соответствии требованиям по выбросам NO_x IMO Tier 2. Принципиальная схема наддува 20-цилиндрового двигателя показана рис. 3.3.

Группа из двух идентичных турбокомпрессоров НД и ВД обслуживает четыре цилиндра, соответственно двигатель 12V имеет три группы ТК, 16V — четыре и 20V — пять). Воздух между ступенями ВД и НД охлаждается.

Компоновка системы наддува, выполненная на двигателе, отличается компактностью и оригинальностью охлаждения корпусов за счет встраивания газоподводящих корпусов ТК в выпускной коллектор постоянного давления.

СИМАС 2016. Новые двигатели MTU серии 4000, обеспечивающие пределы эмиссии в соответствии с требованиями EU Stage IIIB, EPA Tier 4 и IMO Tier 3 [21]

После выхода на рынок в 1996 г. двигатели серии 4000 получили широкое распространение на железнодорожном и морском транспорте, в горнодобывающей, нефте- и газодобывающей промышленности, в производстве электроэнергии. Выпускаются они в 12, 16 и 20 цилиндровом V-образном исполнении и охватывают диапазон мощностей от 1000 до 4300 кВт. Фирма MTU предлагает новую модель двигателей серии 4000 — тип 05, которая удовлетворяет требованиям по выбросам вредных веществ EU Stage IIIB, EPA Tier 4 и IMO Tier 3.

В зависимости от конкретных условий применения MTU предлагает различные технологические решения для снижения выбросов: двухступенчатая система наддува (ДСН), регистровый наддув (РН), рециркуляция отработавших газов (EGR), селективное каталитическое восстановление (SCR), фильтр частиц (DPF).

Для двигателей серии 4000 используются «внутренние» технологии снижения выбросов ОГ непосредственно на двигателе. Необходимость сохранить вес двигателя и габариты на минимальном уровне исключает возможность применения внешних устройств для очистки от-

работавших газов. Параметры нового ряда двигателей, поставленных на производство в 2015 г. представлены в табл. 3.2.

Для снижения выбросов используются следующие технологии:

- ДСН с промежуточным охлаждением наддувочного воздуха;
- цикл Миллера;
- аккумуляторная система подачи топлива с давлением впрыска до 2500 бар;
- рециркуляция охлажденных ОГ от «донорских» цилиндров;
- максимальное давление сгорания доведено до 200 бар;
- электронная система управления двигателем с контролем эмиссии.

ДСН сконструирована в развале блока цилиндров двигателя (рис. 3.4, 3.5) и включает в себя: турбокомпрессоры НД (2шт.) и ВД (1шт.), агрегаты промежуточного охлаждения воздуха. Схема подвода газа и воздуха аналогична схеме для 16 цилиндрового двигателя (см. рис. 3.1).

Конструктивные особенности турбокомпрессоров: колесо компрессора — из титана; турбина — осердиальная с высоким уровнем КПД и низким

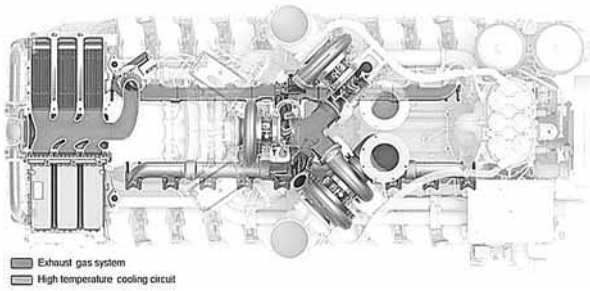


Рис. 3.4. Газовыпускная система с клапанами управления EGR и перепуском газа с турбины высокого давления

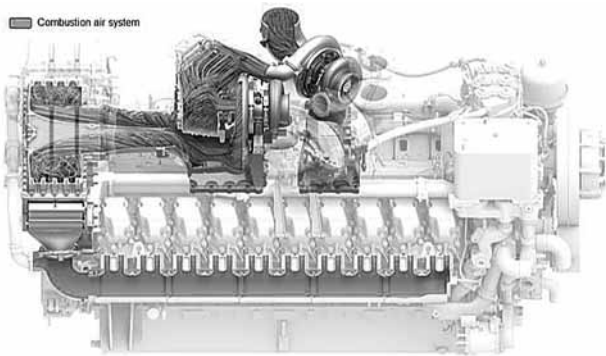


Рис. 3.5. Оптимизированная система наддува

моментом инерции; межступенчатые холодильники и основной холодильник наддувочного воздуха встроены в низкотемпературный контур охлаждения. Воздух, поступающий в цилиндры, имеет температуру ниже 70 °С и давление более 5 бар.

Двигатель работает со средним эффективным давлением до 20 бар при частотах вращения до 1300 об/мин, что на 30 % выше по сравнению с аналогом. Характеристика зависимости мощности от частоты вращения (для экскаваторов) позволяет работать с постоянной номинальной мощностью в диапазоне оборотов от 1500 до 1830. Для дизель-электрических самосвалов это может быть использовано для оптимизации работы по генераторной характеристике. Для дизель-гидравлических экскаваторов, это означает, что при шаге нагрузки от 10 до 90 % мощность может быть реализована на 50 % быстрее.

ДСН сохраняет способность двигателя работать в экстремальных условиях эксплуатации. Так, несмотря на падение давления более чем на 30%, двигатель способен работать с полной нагрузкой на высоте до 3200 м. На рис. 3.6 приведено изменение объемного (требуемого) расхода компрессоров НД в системе наддува на номинальном режиме работы при различных внешних условиях. Точка совместной работы двигателя и системы наддува на характеристике компрессора НД при падении температуры окружающей среды приближается к границе помпажа. При

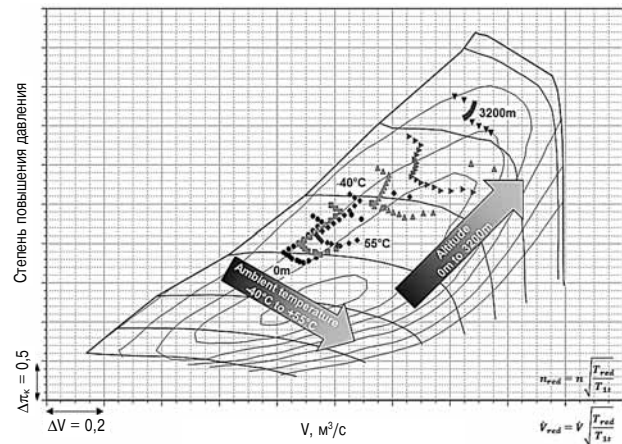


Рис. 3.6. Влияние высоты и температуры окружающей среды на положение точки совместной работы компрессора низкого давления и двигателя на номинальной мощности (3000 кВт при 1800 об/мин)

увеличении высоты и снижении давления частота вращения ТК увеличивается, и рабочая точка перемещается в зону высоких π_k (см. рис. 3.6). Широкая характеристика компрессора по диапазону расхода при высоком КПД обеспечивает достаточный расход воздуха при всех неблагоприятных условиях.

Определенный вклад фирма MTU внесла в защиту окружающей среды за счет снижения выброса углекислоты. Применение ДСН позволило увеличить мощность и повысить КПД двигателя, снизить расход топлива. Как следствие, серийный двигатель 16V может быть заменен на двигатель 12V (Tier 4) с уменьшенной массой и экономией топлива около 3 % при одинаковой мощности двигателя.

4. «Kompressorenbau Bannewitz GmbH» (КВВ) CIMAC 2013. Новые турбокомпрессоры для современных крупных двигателей с низкой эмиссией и высокими характеристиками [22]

Для выполнения требований IMO Tier 3 фирма КВВ в рамках программы K2B разработала новые ряды турбокомпрессоров для ДСН. Они обеспечивают наддув дизелей, газовых двигателей и двигателей, работающих на тяжелом топливе, мощностью от 0,5 до 5 МВ при степени повышения давления до 10.

Для ступени НД используется ТК с радиальной турбиной на основе турбокомпрессоров HPR или ST или вновь разработанный турбокомпрессор HPA с осевой турбиной (рис. 4.1). Оптимизированные для работы на частичных нагрузках турбокомпрессоры HSR с радиальной турбиной используются для ступени ВД (рис. 4.2).

Для проверки характеристик и выполнения всесторонних испытаний на соответствие заданным техническим требованиям был введен в строй специальный стенд для испытаний ДСН.

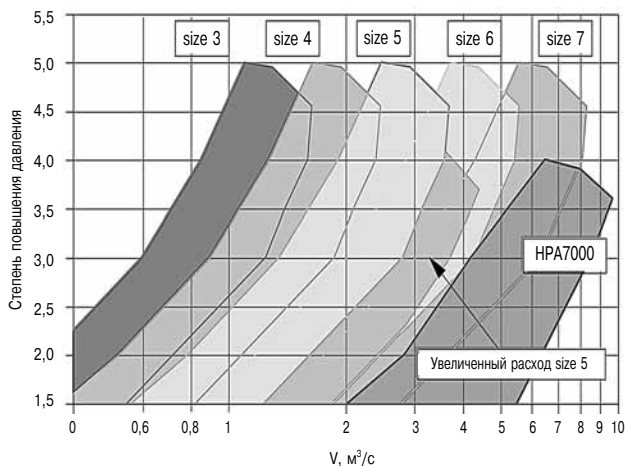


Рис. 4.1. Ряд турбокомпрессоров низкого давления с радиальной и осевой (НРА) турбинами для ДСН

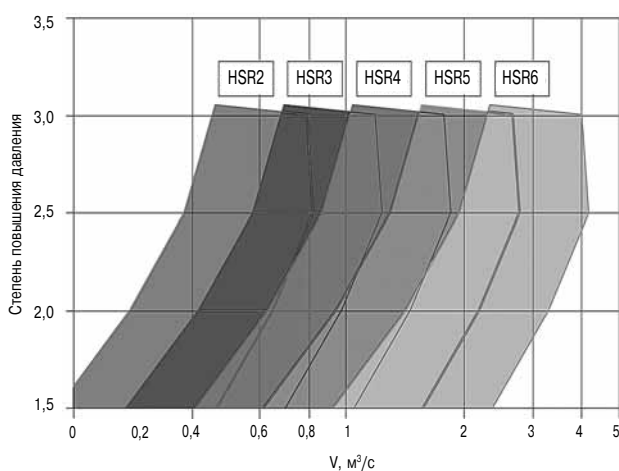


Рис. 4.2. Ряд турбокомпрессоров высокого давления с радиальной турбиной для ДСН

Он оборудован перепусками от компрессора и турбины ТК высокого давления, что позволяет получить эксплуатационные характеристики для основных применений ДСН на двигателях мощностью до 2МВ. Кроме того, экспериментальная установка обеспечивает возможность встраивания системы EGR.

В качестве примера в докладе представлены результаты моделирования четырехтактного шестицилиндрового рядного двигателя. Двигатель может работать вне зоны контроля эмиссии (ЕСА) на тяжелом топливе или в контролируемой зоне на легком топливе для СОД. Расчетами установлено, что для выполнения требований IMO Tier 3 по эмиссии NO_x, требуется рециркуляция около 20 % выпускных газов при работе двигателя в зоне, контролируемой по эмиссии. Газ на рециркуляцию отбирается перед турбиной ВД и подается на вход в компрессор ВД. Результаты моделирования показали оптимальную настройку системы при значении рециркуляции, равной 8–12 %.

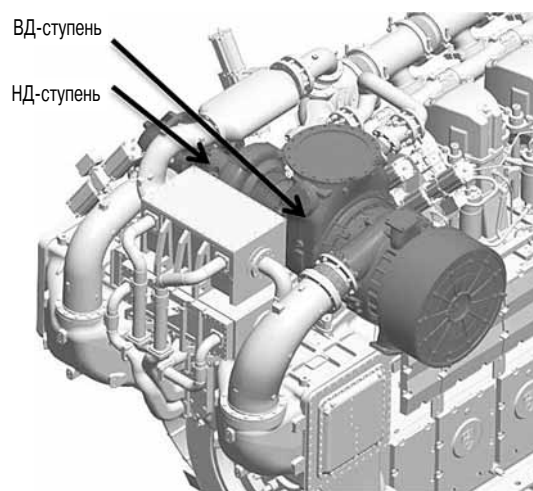


Рис. 4.3. Компоновка двухступенчатой системы наддува на двигателе

ДСН представляет собой хорошо скомпонованный агрегат, благодаря использованию осевой турбины (рис. 4.3). Турбокомпрессор HSR6 с радиальной турбиной используется как ступень ВД, а HPA7000 с осевой турбиной как ступень НД. Прямая подача ОГ в осевую турбину НД от радиальной турбины ВД является благоприятным фактором. Для управления системой наддува на турбине ВД применен перепуск газа.

Разработанная фирмой КВВ ДСН была реализована фирмой «Anglo Belgian Corporation» на шести цилиндровом рядном двигателе 6DL36.

СИМАС 2016. Турбокомпрессоры для нового поколения двигателей [23]

Для выполнения требований по ограничению эмиссии NO_x двигателями с ОСН, фирма КВВ предлагает турбокомпрессор серии ST27 со степенью повышения давления до 5,5. Для двигателей с более высокой мощностью разработана двухступенчатая система наддува K2B, которая обеспечивает давление наддува до 10 бар.

Для ступеней низкого и высокого давления ДСН используются ТК, ряды которых были представлены на конгрессе СИМАС 2013 [22] (см. рис. 4.1 и 4.2).

Испытания ДСН проводятся на специальном стенде (рис. 4.4) в условиях, близких к работе на двигателе. Температура воздуха при промежуточном охлаждении может изменяться от 40 до 140 °С. На стенде имеется перепуск на компрессоре и турбине и рециркуляция ОГ.

Благодаря наличию быстродействующих клапанов имеется возможность вести исследования не только установившихся, но и переходных процессов.

Испытания ДСН K2B проведены в начале 2014 г. на главном судовом шестицилиндровом двигателе фирмы «Yanmar». Испытания про-

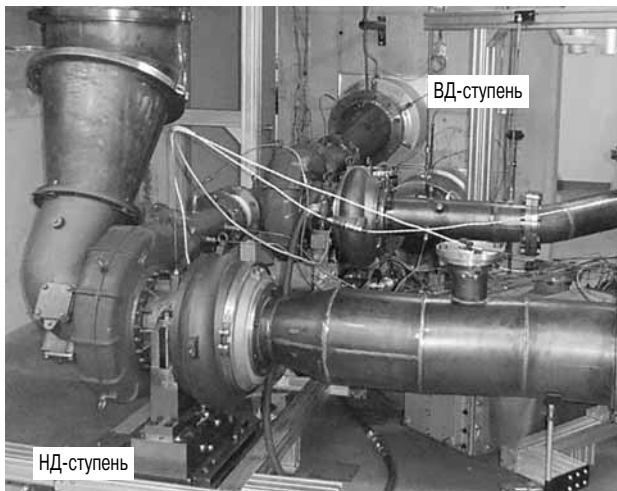


Рис. 4.4. Стенд для испытания двухступенчатой системы наддува

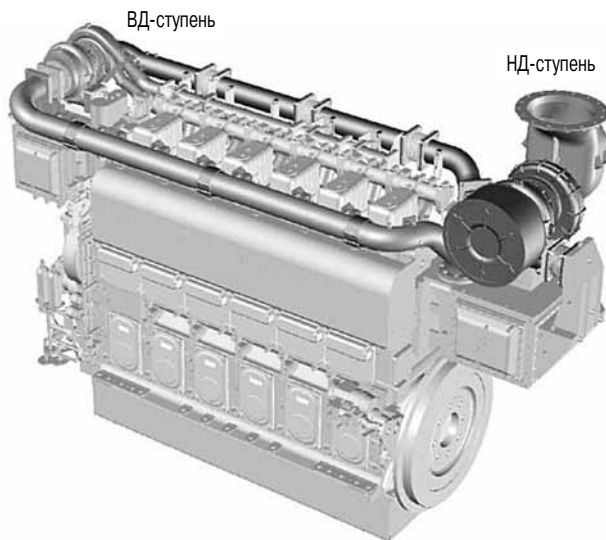


Рис. 4.5. Главный пропульсивный двигатель с ДСН К2В

водились на тяжелом топливе и топливе для СОД для снижения расхода при выполнении стандартных правил IMO Tier 2 по выбросам NO_x . ДСН К2В включает турбокомпрессор НД — размер 5 и турбокомпрессор ВД — HSR4 (рис. 4.5) с общей степенью повышения давления 5,6, что позволило повысить КПД на 8 % по сравнению с ОСН.

Ревизия ТК через год работы (более 4000 часов) показала, что основные детали, такие как подшипники скольжения и уплотнение вала в хорошем состоянии, без типичных износов.

ДСН К2В также прошла испытания на газовом двигателе с искровым зажиганием. Эти двигатели имеют гораздо более высокую температуру отработавших газов (до 650°C) перед турбиной, поскольку их основной режим работы — полная нагрузка. Система К2В была опробована на

двигателе Wartsila W20V32SG. Этот двигатель был оснащен ступенями НД двух турбокомпрессоров HPA7000 и ступенями ВД двух турбокомпрессоров HSR6. Система обеспечила общую степень повышения давления равную 6,6. По сравнению с базовым двигателем с ОСН, КПД системы наддува был увеличен на 10 %, а КПД двигателя на 2 %.

Фирма KBB занимается также разработкой ТК для системы EGR. Создание таких ТК требует учета условий эксплуатации турбокомпрессора в системе рециркуляции. Возникают требования к прочности колеса компрессора при температуре на входе до 140°C и износостойкости деталей компрессора от воздействия агрессивного конденсата и твердых частиц.

Применяются различные системы рециркуляции ОГ:

- HP-EGR (газ забирается из выпускного коллектора и подается в турбокомпрессор рециркуляции или в воздухоудку с электроприводом);

- SSR (semi-short route) — EGR (газ забирается из выпускного коллектора и подается в турбокомпрессор ВД);

- донорский цилиндр (газ забирается из цилиндра и подается в ресивер воздуха).

По мнению фирмы KBB, системы EGR для больших дизелей, в которых давление наддува выше давления в выпускном коллекторе, находятся в стадии разработки, и пока не существует оптимальной технологии EGR. Поэтому фирма проводит исследования систем HP-EGR и SSR-EGR, которые рассматривает как наиболее работоспособные.

Испытания системы HP-EGR были выполнены на стенде ДСН и в эксплуатации с EGR турбокомпрессором на V-образном дизеле мощностью 10 МВт. Испытания были проведены с целью снижения эмиссии и подтверждения возможности использования агрегата наддува для системы рециркуляции. Двигатель имел по два турбокомпрессора HPA7000 и HSR6, соответственно в ступенях НД и ВД. Турбокомпрессор HSR4 использовался как агрегат EGR.

Газ для рециркуляции отбирается перед турбинами ВД, охлаждаются до 140°C в высокотемпературном EGR охладителе и подается в компрессор ТК EGR, после которого снова охлаждаются в низкотемпературном охладителе EGR и поступает в ресивер. Параллельно ОГ подаются к турбине EGR, после которой разделяется и направляются на вход каждой турбины НД (рис. 4.6).

Значительная часть ОГ проходит через турбину EGR, уменьшая долю ОГ на турбины ВД, поэтому они должны иметь низкую пропускную

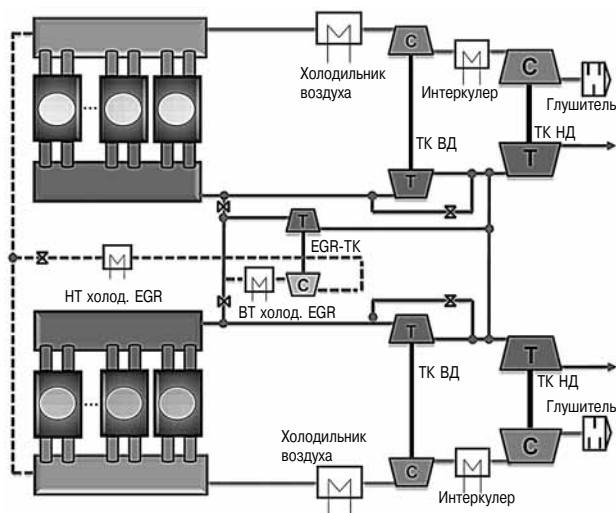


Рис. 4.6. Двухступенчатая система наддува с рециркуляцией HP-EGR

способность. При отключении системы рециркуляции турбины ВД пойдут в «разнос», чтобы этого не произошло, на них включается перепуск. Настройка системы наддува с рециркуляцией и перепуском была выполнена на основе моделирования, результаты которого показали, как будет меняться положение точки совместной работы двигателя и ДСН при включении и отключении рециркуляции и перепуска (рис. 4.7). Из представленных диаграмм видно, что отключение рециркуляции ведет к смещению точки совместной работы на характеристике компрессора НД в зону увеличенного расхода и пониженного КПД и к неоптимальному распределению степеней повышения давления между ступенями НД и ВД. Кроме того, для эффективной работы такой системы компрессор ВД должен иметь широкую характеристику по диапазону расходов с приемлемыми значениями КПД.

SEMI-SHORT ROUTE EGR (SSR-EGR) — второй вариант системы рециркуляции, предлагаемый КВВ. Этот вариант более простой. Часть ОГ отбирается перед турбиной ВД, охлаждается и направляется на вход в компрессор ВД (рис. 4.8).

Основная проблема этой системы — загрязнение проточной части компрессора ВД и падение КПД системы наддува. Уже через несколько часов работы двигателя на полной нагрузке с рециркуляцией ОГ равной 20 %, появляются вязкие отложения на колесе компрессора и в области входного отверстия вставки. Эти отложения трудно удалить даже при частых и интенсивных промывках компрессора. Поэтому значительная часть доклада посвящена анализу формирования отложений и методам борьбы с ними. Выполненный анализ показал, что уменьшить отложения можно только за счет снижения КПД системы наддува, но фирма КВВ надеется получить ком-

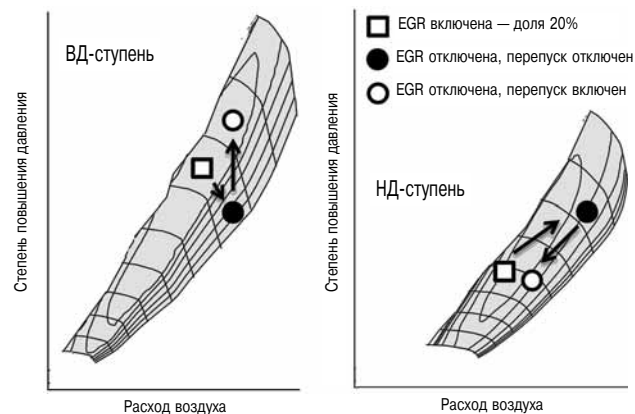


Рис. 4.7. Управление перепуском на турбине высокого давления

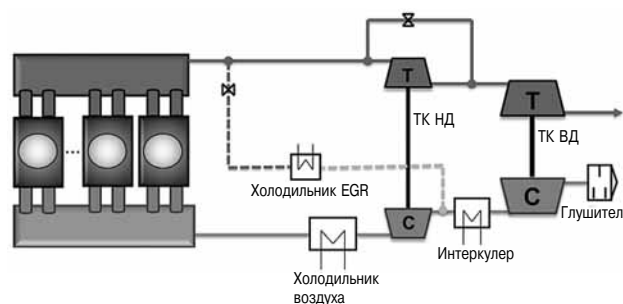


Рис. 4.8. Схема рециркуляции SEMI-SHORT ROUTE EGR

промисленный вариант и продолжает работы в этом направлении. Одновременно фирма ведет разработку специальных ТК для системы рециркуляции для двигателей с ОСН мощностью от 500 до 1500 кВт.

Продолжение следует

Литература

16. Astrand U., Aatola H., Myllykoski J. Wartsila 31 — World's most efficient fourstroke engine. № 225, CIMAC 2016, Helsenky.
17. Wintruff I., Buecheler O., Huchler S. The next generation of MTU series 4000 rail engines to comply with EU/III B emission legislation. Paper № 211, CIMAC 2010, Bergen.
18. Dohle U. MTU Solutions for Meeting Future Exhaust Emissions Regulations. Paper № 284, CIMAC 2010, Bergen.
19. Mattes P., Rimmels W., Sudmanns H. «Untersuchungen zur Abgasrückführung am Hochleistungsdieselmotor», MTZ Motortechnische Zeitschrift, volume 60 (issue 4), 1999, P 234–243.
20. Kurreck M., Werner Rimmels W. Series 1163-04. Paper № 112, CIMAC 2013, Shanghai.
21. Harscher S., Bucheler O., Schneemann J., Brunner C., Wehler K. The New MTU Series 4000 with Advanced Technological Concepts for EU Stage IIIB, EPA Tier 4 and IMO 3 Emission Regulations. № 196, CIMAC 2016, Helsenky.
22. Risse S., Buchmann K. New turbochargers for modern large engines with low emissions and high performance. Paper № 226, CIMAC 2013, Shanghai.
23. Risse S., Buchmann K. Turbocharger Solutions for New Engine Generations. № 265, CIMAC 2016, Helsenky.