

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) для дизелей различного применения по материалам публикаций лидеров мирового двигателестроения: «ABB Turbo Systems Ltd.»; «Wartsila Corporation Research & Development»; «MTU Friedrichshafen GmbH»; «Kompressorenbau Bannewitz GmbH»; «MAN Diesel & Turbo»; «YANMAR Co., Ltd.». Показано, что на современном этапе развития ДСН представляет собой сложную и дорогостоящую систему, исследование, разработка и производство которой доступны весьма ограниченному числу фирм. Развитие ДСН с общей степенью повышения давления до 12 и КПД до 80 % вызвано необходимостью обеспечить соответствие требованиям энергоэффективности силовых установок с дизелями на объектах применения при одновременном снижении выбросов NO_x в сочетании с технологиями EGR и глубоким циклом Миллера до уровня требования перспективных международных стандартов IMO Tier 3 и EU Stage IIIB без внешних систем очистки газов.

Окончание. Начало см. № 1, 2 2017

5. «MAN Diesel & Turbo» (MDT)

СИМАС 2010. Возможности «внутренних» технологий для снижения выбросов среднеоборотных дизелей до требований IMO Tier 3 [24]

В рамках исследовательского проекта HERCULES фирма MAN провела испытания двигателя 6L32/44CR с ДСН, устройством управления закрытием впускного клапана и регулируемой турбиной ТК ВД (рис. 5.1).

По сравнению с двигателем, изначально соответствующим требованиям IMO Tier 1, стало возможным при незначительном повышении расхода топлива снизить выбросов NO_x более чем на 40 %, увеличить цилиндковую мощность от 560 до 640 кВт (рис. 5.2), обеспечить низкую дымность отработавших газов. Регулируемая турбина ВД существенно улучшает параметры двигателя за счет увеличения давления наддува на частичных нагрузках, и обеспечивает хорошее качество переходных процессов.

Исследования показали, что двигатель 6L32/44CR с ДСН, соответствующий требованиям IMO Tier 2, имеет удельный расход топлива на 3–5 % ниже по сравнению с двигателем с ОСН,

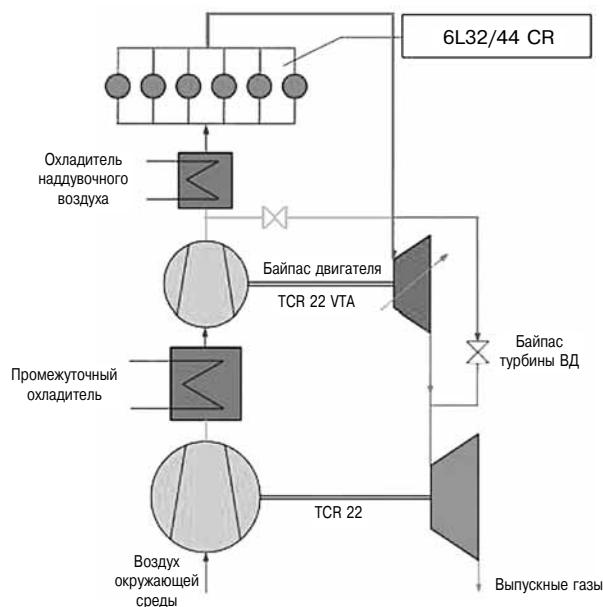


Рис. 5.1. Двухступенчатая система наддува двигателя фирмы MAN 6L32/44CR с регулируемой турбиной

удовлетворяющим тем же требованиям. Фирма MAN рассматривает ДСН как базу для достижения требований IMO Tier 3 в двигателях с реакторами SCR.

СИМАС 2016. Модульная конструкции среднеоборотных газовых двигателей фирмы «MAN Diesel & Turbo» [25]

Низкая стоимость топлива и крайне низкий уровень вредных выбросов газовых двигателей по сравнению с современными дизелями делает их все более привлекательными для применения. Фирма «MAN Diesel & Turbo SE» предлагает широкий ассортимент высокоэффективных четырехтактных среднеоборотных газовых и двухтопливных двигателей с диапазоном мощности от 0,5–21,6 МВт. Эти двигатели пригодны для использования совместно с системами утилизации тепла, силовой турбиной и паровым котлом.

В номенклатуре газовых двигателей особое место занимают модели V35/44GTS и V51/60GTS с циклом Миллера и ДСН. К характерной особенности ДСН относится возможность ее установки вне двигателя или, по крайней мере, отдельная установка турбокомпрессора НД. По оценке фирмы КПД ДСН выше на 5–10 % по сравнению с ОСН (рис.5.3)

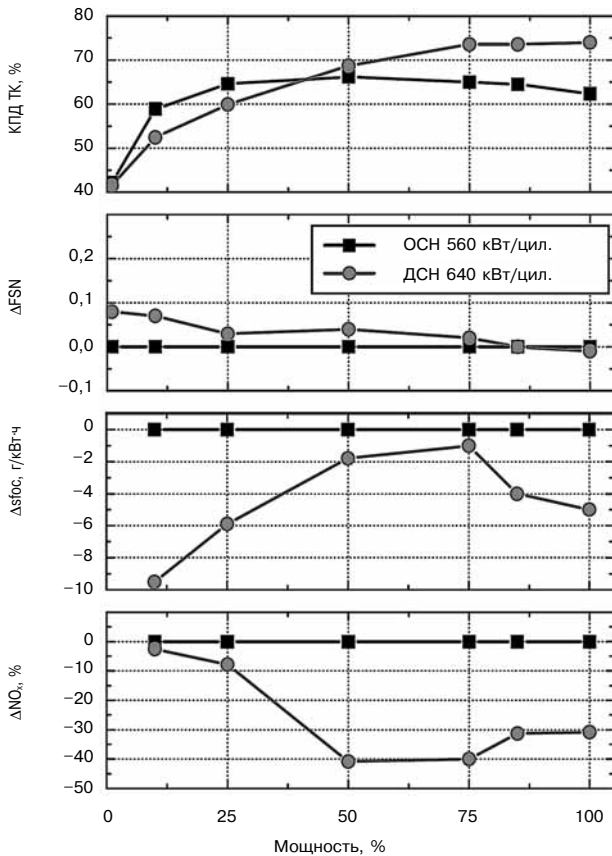


Рис. 5.2. Параметры двигателя фирмы MAN 6L32/44CR с одноступенчатой и двухступенчатой системами наддува

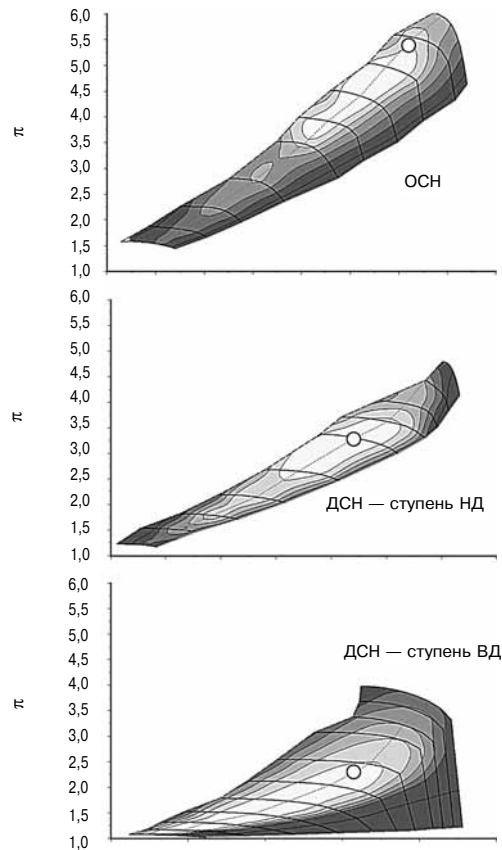


Рис. 5.4. Характеристики компрессора ОСН, компрессора НД ДСН и компрессора ВД ДСН

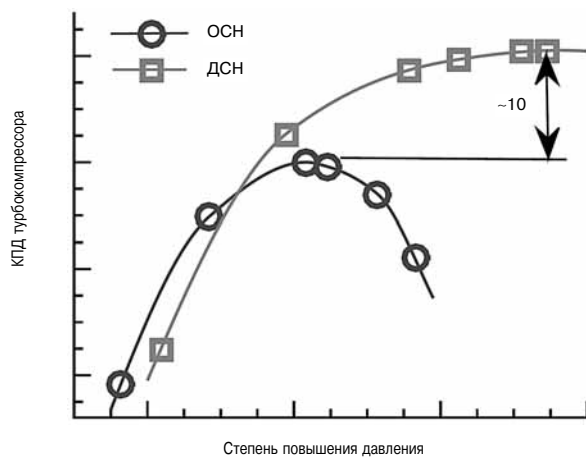


Рис. 5.3. КПД двухступенчатой и одноступенчатой систем наддува

По результатам испытаний установлено, что между КПД системы наддува и двигателя существует корреляционная связь. Повышение КПД системы наддува на 10 % дает увеличение КПД двигателя на 1 %. Поэтому возможности ДСН целесообразно использовать одновременно с оптимизацией термодинамического цикла.

Требования к характеристикам компрессоров ОСН и ступеней компрессоров ДСН различны

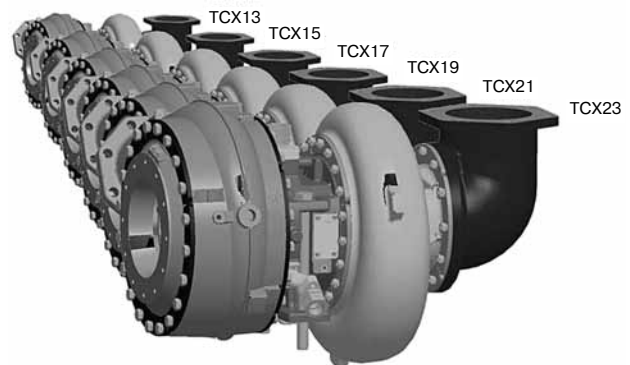


Рис. 5.5. Турбокомпрессоры ВД для ДСН фирмы MAN

(рис. 5.4). Характеристика компрессора ОСН показывает, что достигнута $\pi_k = 5,5$, при этом максимальный КПД соответствует $\pi_k = 4,0-5,5$ (тип TCR). При установке ДСН для компрессора ВД (типа TCX) требуется $\pi_k = 1,5-3,0$, а для компрессора НД (тип TCR) $\pi_k = 3,0-4,0$. Из рисунка видно, что компрессор НД имеет более высокое π_k . В зависимости от требуемой общей степени повышения давления и распределения π_k между ступенями, характеристики компрессоров должны быть подобраны соответствующим об-

разом, чтобы обеспечить оптимальную работу двигателя.

Для ступеней ВД фирма разработала новый ряд турбокомпрессоров серии ТСХ с радиальной турбиной, предназначенный для двигателей в диапазоне мощностей от 2 до 13 МВт на агрегат наддува (рис. 5.5).

СИМАС 2016. Новое поколение дизелей с большим диаметром цилиндра фирмы MAN [30]

На базе двигателей MAN 48/60CR и 48/60TS с ОСН фирма MAN ведет разработку нового семейства двигателей с большим диаметром цилиндра и ДСН. Сопоставление рабочих параметров базового двигателя MAN 12V48/60CR и нового MAN 12V4x/60CR приведено в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Параметры дизелей MAN 12V48/60CR и нового MAN 12V4x/60CR

Двигатель	12V4x/60CR	12V48/60CR
Диаметр поршня, мм	>400	480
Ход поршня, мм	600	600
Цилиндровая мощность, кВт/цил	>1200	1200
КПД	>50 %	48,6 %
Эмиссия	IMO Tier II IMO Tier III* US EPA Tier 3* World Bank II	IMO Tier II IMO Tier III*
Назначение — судовой	Дизель-редуктор (винт регулируемого шага), дизель-генератор	Дизель-редуктор (винт регулируемого шага), дизель-генератор
Длина, мм	11 320	10 790
Ширина, мм	4824	4730
Высота, мм	5237	5500
Сухая масса, т	217	189

* С системой нейтрализации отработавших газов

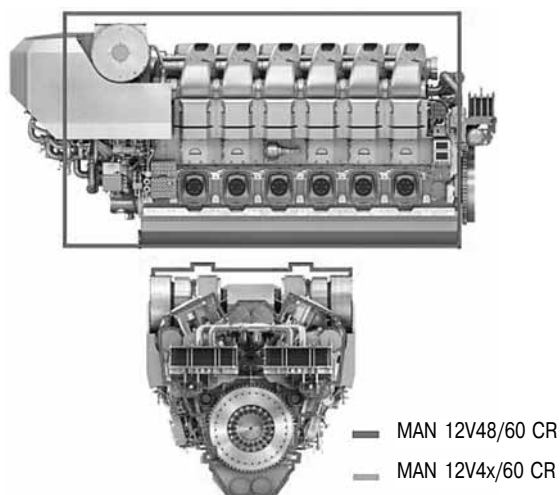


Рис. 5.6. Сопоставление габаритных размеров двигателей 12V4x/60CR и 12V48/60CR



Рис. 5.7. Модуль двухступенчатой системы наддува на двигателе 12V4x/60CR

Установка ДСН на новом дизеле незначительно увеличила его габаритные размеры (рис. 5.6).

Модуль ДСН двигателя 12V4x/60CR представлен на рис. 5.7.

Целью выполняемых разработок является создание двигателя с высоким КПД, повышенной форсировкой по p_{me} до 27 бар и соответствия жестким требованиям по экологии (см. табл. 5.1). Кроме того, предполагается увеличение частоты вращения для повышения мощности.

Частота вращения нового двигателя не приведена. Предположительно она составит 500–540 об/мин, что соответствует скорости поршня 10 м/с. В перспективе планируется увеличение частоты вращения двигателя (скорость поршня приблизится к 12 м/с), а p_{me} будет доведено до 30 бар.

6. «Yanmar» CO., LTD.

СИМАС 2016. Разработка среднеоборотных дизелей с низким расходом топлива [26]

В январе 2013 г. вступило в силу правило ИМО по регулированию выбросов CO₂, и введен для судов конструктивный индекс энергетической эффективности EEDI (Energy Efficiency Design Index), значение которого определяется типом и размерами судна. В связи с этим возникает необходимость снижать расход топлива. Фирма «Yanmar» выпускает вспомогательные двигатели, которые в основном работают на долевых нагрузках. Для повышения КПД двигателя на этих режимах фирма «Yanmar» совместно с фирмой АВВ выполнила ряд разработок.

На первом этапе была предпринята попытка использовать ТК с более высоким КПД во всем

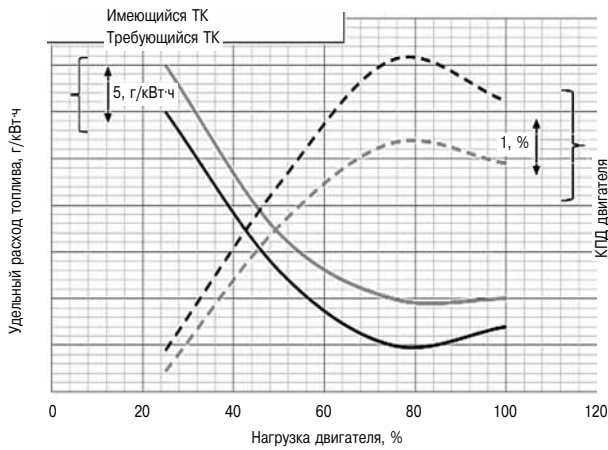


Рис. 6.1. Уровень КПД турбокомпрессора для выполнения ожидаемой эффективности двигателя

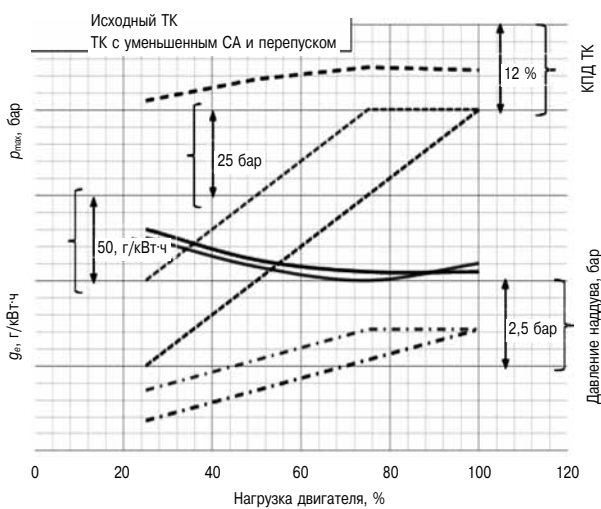


Рис. 6.2. Настройка турбокомпрессора на частичную нагрузку с перепуском газа на номинальной мощности

диапазоне режимов работы двигателя. Для этого требовалась характеристика, представленная на рис. 6.1.

Временные рамки не позволили фирме АВВ разработать соответствующий требованиям турбокомпрессор, поэтому она предложила использовать настройку агрегата наддува на частичную нагрузку с перепуском газа на номинальной мощности (рис. 6.2).

Снижение удельного расхода топлива с настройкой на частичный режим составляет около 5 г/кВт·ч в диапазоне нагрузок от 40 до 80 %, к чему фирма и стремилась. Однако вследствие повышения теплонапряженности деталей камеры сгорания вблизи номинала от этого решения отказались.

Исследования ДСН были выполнены с турбокомпрессорами фирмы АВВ Power2 300 М, имеющими высокий КПД и возможностью настройки на работу в зоне частичных нагрузок за счет оптимального распределения степеней

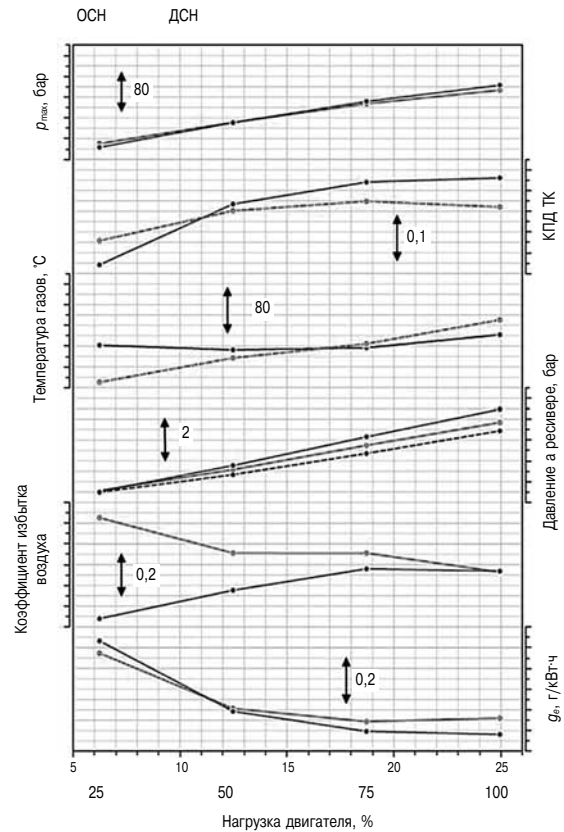


Рис. 6.3. Сравнение рабочих параметров двигателя с ОСН и ДСН (результаты моделирования)

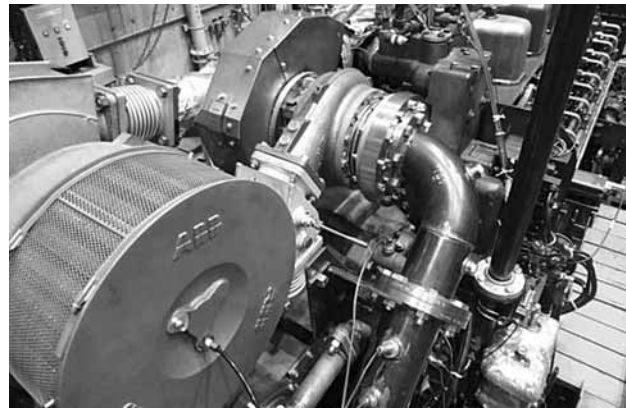


Рис. 6.4. Двухступенчатая система наддува на двигателе 6EY18ALW (только для испытаний)

повышения давления между ступенями ВД и НД. Для сопоставления рабочих параметров двигателя с ДСН и ОСН было выполнено моделирование при заданном ограничении максимального давления сгорания без превышения теплонапряженности и сохранения выбросов на уровне IMO Tier 2. Расчет выполнялся при фиксированных значениях подъема впускного клапана и момента впрыска топлива (рис. 6.3).

Результаты моделирования показали, что ДСН по сравнению с ОСН при нагрузке выше 50 % дает определенный выигрыш. Отмечается, что тепловая нагрузка снижается на номинальной

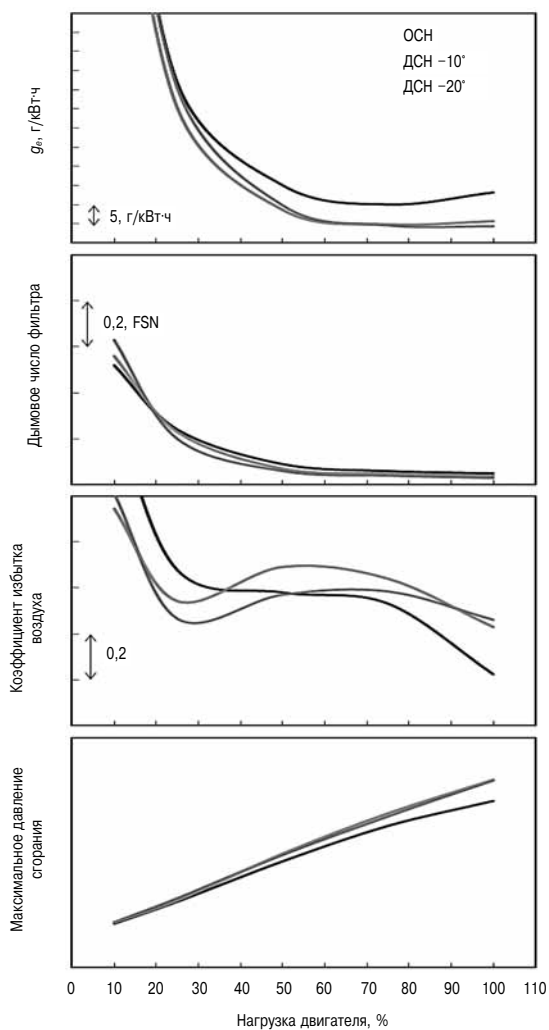


Рис. 6.5. Результаты испытаний двигателя при постоянной частоте вращения

мощности и настройка турбокомпрессоров ВД и НД позволяет регулировать коэффициент избытка воздуха, устраняя избыток воздуха на низких нагрузках.

Перед испытаниями на двигателе было выполнено моделирование ДСН с циклами Миллера различной глубины, для опытной проверки на двигателе было изготовлено два варианта распределительных валов. Испытания проводились на двигателе 6EY18ALW (6ЧН18/28) мощностью 800 кВт (частота вращения в докладе не приведена), работающем на тяжелом топливе (рис. 6.4)

Результаты испытаний приведены на рис. 6.5. При проведении испытаний момент впрыска был оптимизирован для соответствия требований IMO Tier 2 по выбросам NO_x .

Кроме ДСН для улучшения топливной экономичности на частичных нагрузках фирма «Yanmar» использовала электронную систему впрыска топлива, обеспечивающую более высокое давление и оптимизацию момента впрыска, что позволяет снизить удельный расход топлива на 5 г/кВт·ч.

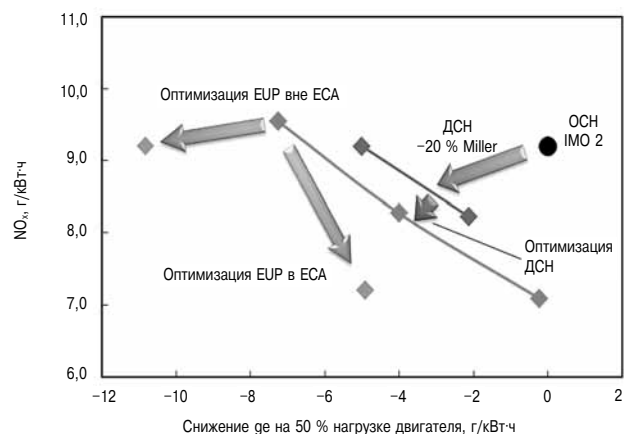


Рис. 6.6. Соотношение между снижением удельного расхода топлива и выбросами NO_x

Результаты исследований фирмы «Yanmar» представлены на диаграмме (рис. 6.6) для 50 % нагрузки двигателя, работающего по генераторной характеристике. В результате выполненных исследований получены следующие результаты:

- фирма выпустила двигатель с ДСН и глубоким циклом Миллера, на котором достигнуто снижение удельного расхода топлива на 8 г/кВт·ч при обеспечении требований по выбросам IMO Tier 2;

- ДСН с глубоким циклом Миллера позволяет достигнуть снижения удельного расхода топлива 5 г/кВт·ч в пределах генераторной характеристики;

- электронная система управления впрыском топлива (EUP) совместно с ДСН обеспечивает снижение расхода топлива до 5 г/кВт·ч при работе в зоне контроля выбросов (ECA), а в неконтролируемой зоне выбросов — g_e до 10 г/кВт·ч.

Заключение

1. Двухступенчатая система наддува (ДСН) все шире используется для снижения выбросов NO_x и улучшения топливной экономичности двигателей со средним эффективным давлением в диапазоне 23–27 бар. На конгрессе CIMAC 2016 вопросы разработки и применения ДСН рассматриваются в 12 докладах, включая выполненные в России. В последние годы ОАО «Коломенский завод», один из основных производителей дизелей в России, разработал новый двигатель Д500 для железнодорожного транспорта. Для выполнения требований EURO III предусмотрено применение ДСН [27]. ПАО «Звезда» проектирует многоцелевой высокооборотный дизель семейства «Пульсар-150М» (ЧН15/17,5), в котором предусматривается ДСН [28, 31]. Уральский дизель-моторный завод на двигателях нового семейства ДМ185(ЧН18,5/21,5) предусматривает выпуск 16-цилиндрового тепловозного двигателя с ДСН [29, 31].

2. ДСН — конструктивно очень сложная дорогостоящая система, применение которой це-

лесообразно только при получении адекватного выигрыша, поэтому систематически и углубленно развитием этой системы занимается ограниченное число фирм.

3. Фирма «ABB Turbo Systems» одной из первых оценила возможности ДСН по снижению удельного расхода топлива на 10 %, а выброс окислов азота на 40 % [4]. Фирмой были проанализированы технологии снижения выбросов NO_x на базе моделирования систем каталитического восстановления (SCR) и рециркуляции отработавших газов (EGR) при использовании ДСН [5]. Рассмотрен комплекс вопросов по оптимальной адаптации ДСН к СОД с $p_{me} = 24$ бар. На основе результатов моделирования установлено соотношение между средним эффективным давлением и требуемым давлением наддува с распределением π_k между ступенями низкого давления (НД) и высокого давления (ВД) для получения максимального КПД системы [6]. АBB разработала ДСН второго поколения Power2 800-М, состоящую из двух отдельных турбокомпрессоров с общей степенью повышения давления до 12 и КПД до 80 % (см. рис. 1.2).

В настоящее время фирмой анализируются перспективы применения ДСН на малооборотных двухтактных дизелях.

4. Фирма «Wartsila», выпускающая среднеоборотные двигатели, имеющие самую высокую форсировку, стала опытным полигоном испытаний ДСН на различных типах двигателей. Разработанная фирмой АBB система наддува Power2 800-М предназначалась в первую очередь для двигателей этой фирмы. В результате многолетних разработок создан целый ряд двигателей с ДСН, в том числе и Wartsila 31 — самый эффективный четырехтактный двигатель [16]. Двигатель Wartsila 31 является базовым двигателем, на основе которого выпускаются три модификации: дизель, газовый двигатель и двухтопливный двигатель.

5. Фирма MTU еще в 2010 г. представила для железнодорожного транспорта новый ряд высокооборотных двигателей серии 4000 R44 с ДСН и EGR, соответствующих требованиям по выбросам NO_x ЕU IIIВ 2012 г. [17]. 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. Турбокомпрессоры для ДСН собственного производства встроены непосредственно в газопускную систему двигателя, что обеспечивает компактность конструкции. В 2016 г. для расширения областей применения двигателей серии 4000 предложена новая модель этого двигателя —

тип 05, которая соответствует требованиям по выбросам EU Stage IIIВ, EPA Tier 4 и IMO Tier 3 [21].

6. В настоящее время две фирмы предлагают турбокомпрессоры для ДСН: «ABB Turbo Systems» и «Kompressorenbau Bannewitz GmbH» (КВВ). Обе фирмы провели испытания на двигателях фирм «Wartsila» и «Yanmar». Следует отметить, что в своих докладах на конгрессе CIMAC 2016 эти фирмы не упоминают об испытаниях систем ДСН с турбокомпрессорами КВВ.

Для выполнения требований по выбросам IMO Tier 3 одновременно с ДСН требуется EGR. MTU запатентовала EGR с донорским цилиндром. Видимо, поэтому КВВ ведет интенсивную разработку вариантных систем: EGR-турбокомпрессор или подача отработавших газов из выпускного коллектора на вход в компрессор высокого давления. Но в этих системах компрессор быстро загрязняется, и КПД системы наддува резко падает.

7. Фирма «MAN Diesel & Turbo SE» готовит к выпуску среднеоборотный четырехтактный двигатель с диаметром цилиндра более 400 мм с КПД более 50 % и высокой форсировкой по среднему эффективному давлению [30].

8. Современные газовые двигатели из-за низкой стоимости топлива и крайне низкими выбросами вредных веществ по сравнению с дизелями становятся все более привлекательными для различного применения. Применение ДСН на этих двигателях позволяет добиться существенного повышения мощности и эффективности, что наглядно демонстрирует фирма «Wartsila» [15]. Отметим, что и фирма «MAN Diesel & Turbo SE», несмотря на широкий ассортимент выпускаемых СОД, также предлагает на рынок двигатели с ДСН, в первую очередь газовые двигатели [25].

Литература

24. Tinschmann G., Thum D., Schlueter S., Pelemis P., Stiesch G. Sailing towards IMO Tier III - Exhaust Aftertreatment versus Engine-Internal Technologies for Medium Speed Diesel Engines. Paper № 274, CIMAC 2010, Bergen.
25. Auer M., Bauer M., Knafel A., Stiesch G. MAN Diesel & Turbo SE's Medium Speed Gas Engine Portfolio — a Modular Matrix Design. № 163, CIMAC 2016, Helsinki.
26. Fukui Y., Hamaoka S., Takahata Y., Tremuli P. Development of Low Fuel Consumption Technology for Medium Speed Diesel Engines. № 148, CIMAC 2016, Helsinki.
27. Jacoby P., Laaksonen M., Ryzhov V., Knelz V. Turbocharging System Optimization for Kolomna D500 Newly Designed Engine Platform. № 290, CIMAC 2016, Helsinki.
28. Kling W., Khilchenko S., Arkhipov A., Toth A., Fuchs C., Ronchetti M., Ludu A. The New ZVEZDA's Multi-Purpose High Speed Diesel Engine Family «PULSAR - M150». № 266, CIMAC 2016, Helsinki.
29. Mather V., Furzikov V., Malcev V., Nochvin I., Bozhenov A., Braning O., Rauschen R., Meessen M., Heuser P. UDMZ's New DM-185 Diesel Engine Family. № 093, CIMAC 2016, Helsinki.
30. Kunkel S., Menage A., Unfug F., Stiesch G. The next generation of MDT's large bore diesel engines. № 181, CIMAC 2016, Helsinki.
31. Развитие модельного ряда двигателей ПАО «Звезда» и ООО «УДМЗ» (материалы конгресса CIMAC 2016). Двигателестроение. — 2016, №. 3. — С. 32–55.