

ОЧЕРЕДНОЙ ШАГ В РАЗВИТИИ ДВУХСТУПЕНЧАТЫХ СИСТЕМ НАДДУВА (обзор докладов конгресса СИМАС)

Г.Е. Ципленкин, к.т.н., В.И. Иовлев, к.т.н.
ООО «ТУРБОКОМ»

Двухступенчатая система наддува (ДСН) относится к самым эффективным средствам улучшения топливной экономичности двигателей и снижения эмиссии NO_x . В связи с необходимостью обеспечить требования IMO Tier 3 в двигателестроении широким фронтом ведутся работы по созданию ДСН с системами EGR для крупных судовых среднеоборотных дизелей и газовых двигателей. Разработка новых проточных частей компрессоров и турбин обеспечила достижение общей степени повышения давления $\pi_k = 12$ при КПД около 80 %. Дается краткий анализ развития ДСН и результаты, представленные на конгрессе СИМАС 2013 производителями турбокомпрессоров.

В связи с необходимостью повышения мощности и улучшения топливной экономичности дизелей вопросы создания систем двухступенчатого наддува (ДСН) привлекали исследователей уже в 60–70-е гг. прошлого столетия. Однако в выполненных установках диапазон степеней повышения давления не превышал значений 4,0–6,0, поэтому создание надежных и эффективных одноступенчатых турбокомпрессоров (ОСН) с аналогичными параметрами отодвинуло широкие исследования ДСН на более поздний период. И только обострившиеся проблемы по снижению эмиссии NO_x с отработавшими газами ускорили возвращение к этим системам.

Достаточно глубокий анализ ДСН, как средства снижения выбросов NO_x на 4-тактных среднеоборотных дизелях, был представлен на конгрессе СИМАС 2007 [1–3]. Фирма АВВ [1] дала краткий обзор мер по снижению эмиссии NO_x и проанализировала возможности снижения эмиссии NO_x на базе моделирования работы системы рециркуляции отработавших газов (EGR) совместно с ДСН. Фирма Вяртсила [2] привела результаты моделирования и экспериментальных исследований двигателя Wartsila W20V32 со средним эффективным давлением (p_{me}) 27,3 бара. Двигатель работал по циклу Миллера с ДСН и управляемыми фазами газораспределения.

Результаты исследований показали, что сочетание цикла Миллера с ДСН и укороченной продувкой делает возможным одновременное снижение удельного расхода топлива на 2–3 % и выброса NO_x на 50 %. Эти исследования показали, что ДСН может стать коммерчески привлекательной альтернативой одноступенчатому наддуву.

На конгрессе СИМАС 2010 было уже семь докладов, в которых представлены первые системы ДСН для среднеоборотных и быстроходных газовых двигателей и дизелей.

Фирма АВВ рассмотрела комплекс вопросов по оптимальной адаптации ДСН к среднеоборотному двигателю со средним эффективным давлением $p_{me} = 24$ [4, 5] оптимальное соотношение среднего эффективного давления и требуемым давлением наддува устанавливается с помощью моделирования. Результаты расчетов показали, что эмиссия NO_x уменьшается линейно с ростом π_k , а удельный расход топлива имеет четкий минимум, соответствующий $\pi_k = 7$. Была дана оценка распределения π_k между ступенями низкого давления (НД) и высокого давления (ВД) для получения максимального КПД системы. Выполнен поэтапный параметрический анализ для оценки возможности снижения расхода топлива и эмиссии NO_x при переходе от ОСН к ДСН.

В докладах [5–7] фирма Wartsila сообщала, что приступила к разработке промышленной ДСН для среднеоборотного двигателя W20V32, состоящей из четырех ТК (по одному ТК ВД и НД на каждый блок) с промежуточным охлаждением воздуха. Вся система скомпонована на одном конце двигателя. При настройке двигателя на режим максимальной экономичности было достигнуто снижение удельного расхода топлива на 8,4 г/кВт·ч при содержании $\text{NO}_x = 576$ ppm. При настройке на минимальный выброс $\text{NO}_x = 538$ ppm – снижение удельного расхода составило 4,7 г/кВт·ч [7, 5].

В рамках исследовательского проекта HERCULES фирма MAN провела испытания двигателя 6L32/44CR с ДСН, устройством переменного закрытия впускного клапана (цикла Миллера) и регулируемой турбиной ТК ВД [8, 5]. По резуль-

татам исследований фирма МАН рассматривает ДСН как базу для достижения требований IMO Tier 3 в сочетании с EGR или SCR.

Для удовлетворения заданных пределов эмиссии двигателями внедорожного применения согласно требованиям Директивы ЕС 97/68/EG (ступень ПИВ) фирма MTU разработала новый ряд двигателей серии 4000 R44, соответствующий этим требованиям [9, 10]. Новый ряд 4000 перекрывает диапазон мощностей от 1000 до 3000 кВт для применения в дизель-электрических или дизель-гидравлических локомотивах и маневровых тепловозах. Обеспечение требований по снижению выбросов обеспечивается управляемой рециркуляцией охлажденных отработавших газов и ДСН с тремя ТК (два ТК НД и один ТК ВД с промежуточным охлаждением). Показана компоновка всех элементов системы на 16-цилиндровом V-образном двигателе.

Фирма «Caterpillar» в рамках программы EMІ MIN на основе результатов моделирования установила, что приблизительно 20 % охлажденного выпускного газа будет достаточно для достижения требований для судовых дизелей на уровне IMO Tier 3 без ухудшения топливной экономичности [11].

Таким образом, к 2010 г. был выполнен широкий диапазон исследований и представлены первые промышленные образцы систем двухступенчатого наддува для среднеоборотных и быстроходных газовых двигателей и дизелей. Появились первые серийные двигатели на рынке с подтвержденными заявленными характеристиками, которые дают возможность почувствовать преимущества ДСН. На сегодня около 50 систем первого поколения ДСН фирмы АВВ находится в эксплуатации и отработали более 10 000 ч [12].

На конгрессе СИМАС 2013 представлены разработки новых турбокомпрессоров, учитывающие особенности их работы в составе ДСН и обеспечивающие дальнейшее увеличение общей степени повышения давления до 12.

Далее приводятся рефераты докладов на конгрессе СИМАС 2013, посвященных созданию перспективных систем наддува.

Второе поколение двухступенчатой системы наддува для среднеоборотных газовых и дизельных двигателей [12].

При разработке современных двигателей необходимо одновременно обеспечить: высокий КПД, низкие эксплуатационные расходы, высокую форсировку с соблюдением норм по вредным выбросам. Кроме того, должна быть рассмотрена исходная стоимость затрат для короткого срока окупаемости и обеспечения конкурентоспособности ДВС с газовыми турбинами.

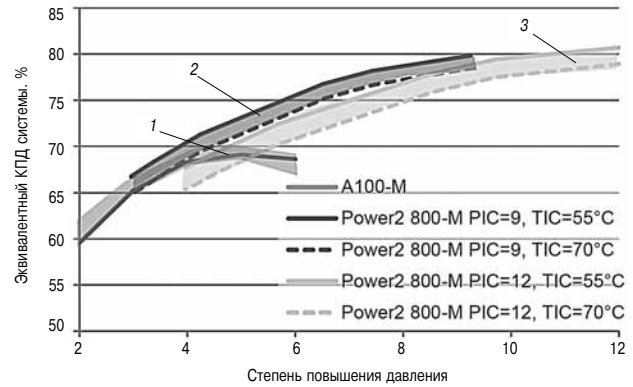


Рис. 1.1. Зависимость КПД системы наддува от степени повышения давления при температуре воздуха на выходе из межступенчатого охладителя TIC 55 и 70 °C:

1 — одноступенчатая система наддува — турбокомпрессор A100-M; 2 — двухступенчатая система наддува Power2 800-M при $\pi_k = 9,0$; 3 — двухступенчатая система наддува Power2 800-M при $\pi_k = 12,0$

Исходя из этих требований фирма АВВ разработала ДСН второго поколения Power2 800-M, состоящую из двух отдельных турбокомпрессоров. Система спроектирована на общую степень повышения давления до 12 и КПД до 80 % (рис. 1.1). Распределение степеней повышения давления по ступеням НД и ВД не дается. Но учитывая, что на приведенных характеристиках компрессоров максимальные значения π_k имеют отношение 1/1,2, то степень повышения давления в НД равна 3,15, а в ВД — 3,8.

Как показали результаты моделирования, использование полных возможностей цикла Миллера и ДСН позволяет снизить эмиссию NO_x на 70 %, а расход топлива на 9 %. Однако этого недостаточно, чтобы обеспечить требования IMO Tier 3, для чего дополнительно необходимы система EGR или очистка газов.

Для второго поколения ДСН разработана полностью новая конструкция турбокомпрессоров. Концепция нового ряда турбокомпрессоров НД и ВД характеризуется тремя признаками: оптимальной характеристикой, легкостью обслуживания и компактностью.

Система включает четыре типоразмера турбокомпрессоров для наддува среднеоборотных двигателей с размерами цилиндра от 300 до 500 мм.

Турбокомпрессоры как ВД, так и НД выполнены с осевыми турбинами, чтобы достичь требуемых больших расходов и обеспечить оптимальную компоновку на двигателе (рис. 1.2 и 1.3).

Компрессор ступени НД имеет высокий КПД и широкую характеристику в зоне больших расходов (рис. 1.4). В ступени ВД используются два варианта компрессора, чтобы перекрыть требуемую область давлений с высоким КПД (рис. 1.5). Для более высоких давлений разработана новая

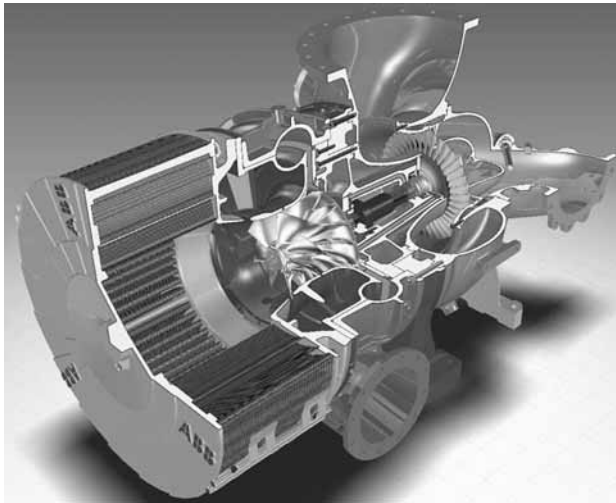


Рис. 1.2. Турбокомпрессор Power2 800-М низкого давления

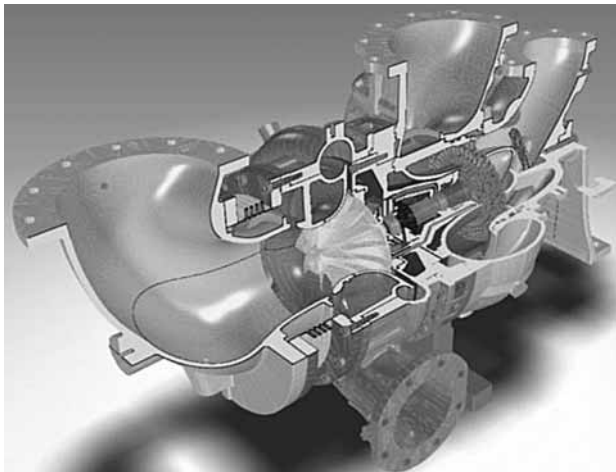


Рис. 1.3. Турбокомпрессор Power2 800-М высокого давления

ступень. Для более низких давлений ступень заимствована из системы первого поколения.

Затененные области характеристик включают зоны с КПД выше 80 %. Все ступени в расчетных точках имеют КПД 84 %.

Спроектированы новые проточные части турбин с учетом специфических характеристик ДСН, т. е. большие проходные сечения в ступени ВД и высокие КПД в ступени НД.

Турбина ВД перекрывает широкую область расходов из-за широкого диапазона давлений и температур на входе. При ограниченном среднем диаметре турбины для оптимального согласования совместной работы с компрессором была разработана компактная ступень турбины с увеличенной пропускной способностью на 20 % (рис. 1.6). Требуемый диапазон удельных объемных расходов для турбины НД сдвинут к нижнему пределу по сравнению с турбинами ОСН, что позволило увеличить ее КПД (рис. 1.7). Максимальный адиабатический КПД турбины НД

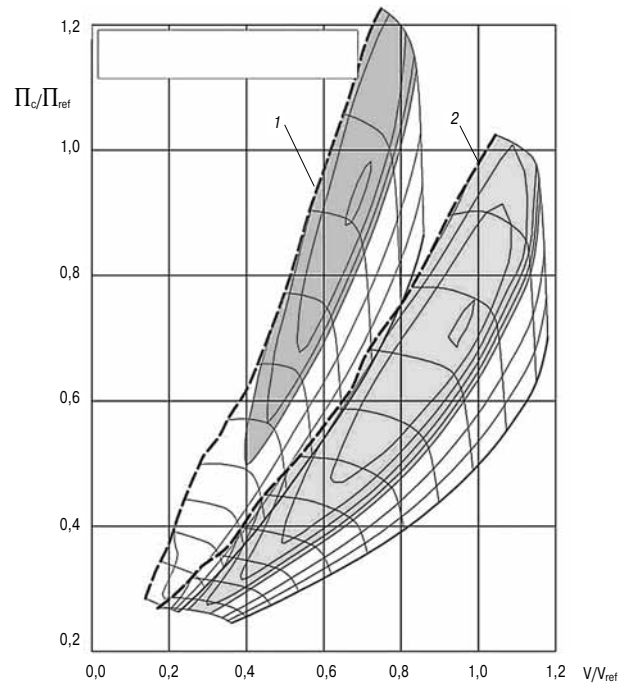


Рис. 1.4. Характеристики компрессоров одноступенчатого ТК (1) и ступени низкого давления ДСН (2)

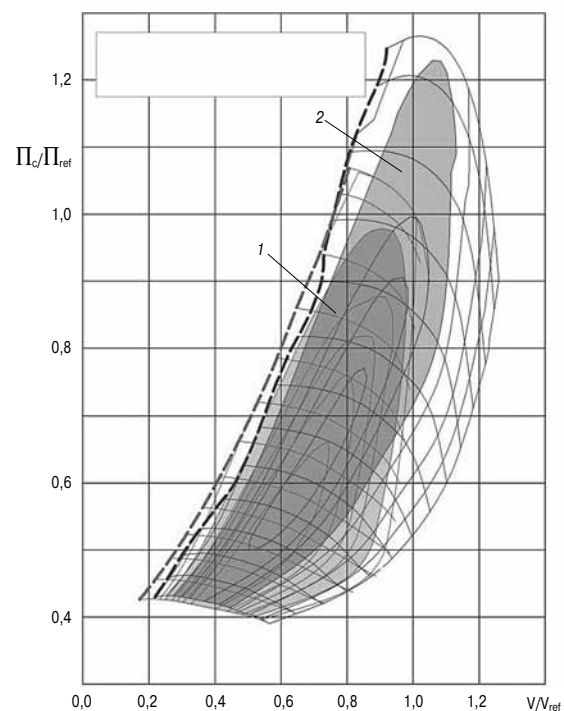


Рис. 1.5. Два варианта характеристик компрессора высокого давления двухступенчатой системы наддува: 1 — вариант на более низкие давления; 2 — вариант на более высокие давления

составляет 89 %, что обеспечивает высокий полный КПД системы.

В случае применения ДСН удобство и сокращение требуемого времени обслуживания двигателя становится особенно важным, так как

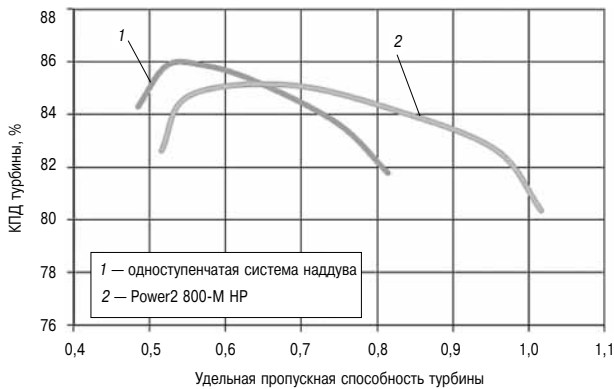


Рис. 1.6. Сопоставление КПД турбины одноступенчатого ТК (1) и турбины высокого давления (2) двухступенчатой системы наддува Power2 800-М

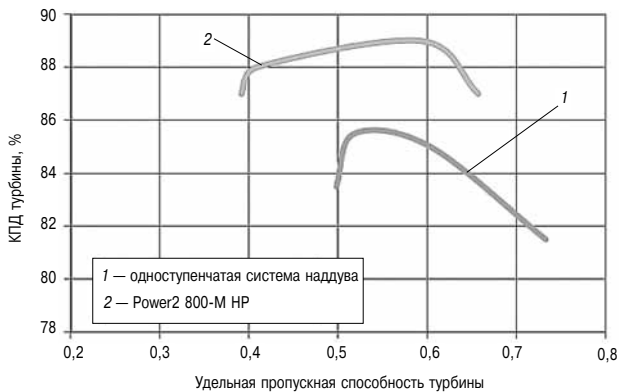


Рис. 1.7. Сопоставление КПД турбины одноступенчатого ТК (1) и турбины низкого давления (2) двухступенчатой системы наддува Power2 800-М

число ТК удваивается. Для ТК среднеоборотных двигателей характерно наличие картриджа, состоящего из ротора и подшипников, установленных непосредственно в корпус. После снятия воздушных корпусов становится возможным быстро извлечь картридж с холодной стороны ТК.

Идея расширенного картриджа состоит в том, что турбокомпрессор имеет внешнюю оболочку, состоящую из корпуса компрессора и газовых корпусов, и расширенный картридж, который содержит полную внутреннюю часть ТК (рис. 1.8). Чтобы сменить такой картридж при обслуживании, достаточно удалить входной корпус компрессора. Все остальные стыковочные связи с двигателем, такие как подвод масла, выходной фланец воздуха, фланцы газовыпускного и газоприемного корпусов остаются нетронутыми. Кроме того, нет необходимости удалять изоляцию.

Для быстрой замены картриджа было разработано специальное приспособление, которое позволяет извлечь или вставить картридж в оболочку турбокомпрессора. При этом грузоподъемное устройство требуется только при удалении картриджа из машинного отделения.

Конструкция турбокомпрессоров предусматривает возможность осмотра эндоскопом. С его

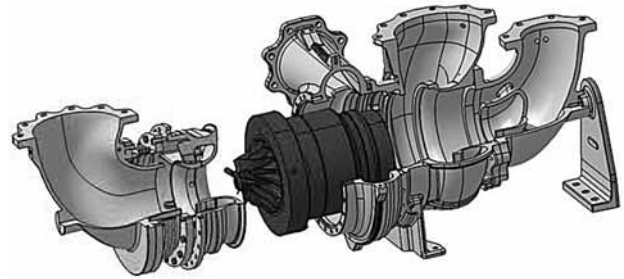


Рис. 1.8. Расширенный картридж ТК

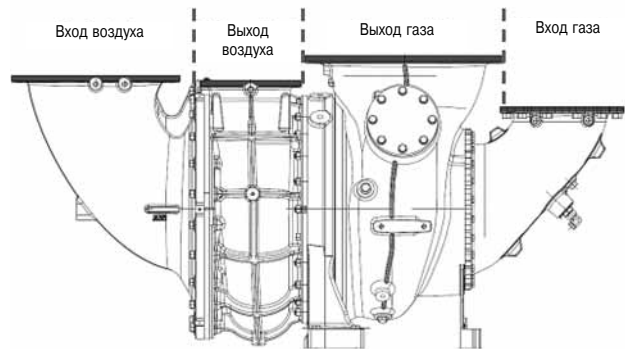


Рис. 1.9. Осевой размер ТК низкого давления, определяемый диаметрами фланца

помощью ступени компрессора и турбины могут быть обследованы без извлечения картриджа.

Установка ДСН на двигателе требует компактной конструкции ТК. Для обеспечения компактности и качества аэродинамических характеристик требуется решение задачи оптимизации при проектировании. Фирма АВВ выполнила аэродинамическую оптимизацию каналов входного корпуса компрессора, газоподводящего и газовыпускного корпусов турбины, что позволило сохранить высокий КПД системы, и при этом уменьшить габариты ТК. Осевая длина ТК была снижена до минимума, который определялся диаметрами фланцев корпусов (рис. 1.9). Размеры диаметров этих фланцев показывают (см. рис. 1.2 и 1.3), что они обеспечивают низкие скорости и высокие КПД.

При разработке корпусных деталей была учтена возможность установки устройств очистки проточных частей. Для турбины был использован новый тип сопла, а для компрессора — новая система впрыска очищающей жидкостью.

Утечка воздуха в систему маслоснабжения двигателя, известная как прорыв газов, представляет нежелательное явление, которое ведет к снижению КПД ТК. Высокий уровень давления в ТК ВД значительно увеличивает перепад давлений на уплотнениях вала и вероятность утечек. В связи с этим были разработаны новые конструкции уплотнений, обеспечивающих снижение утечек на 75 %.

Новые турбокомпрессоры для современных крупных двигателей с низкой эмиссией и высокими характеристиками [13]

Для выполнения требований IMO Tier 3 фирма KVB (Kompressorenbau Bannewitz GmbH) в рамках программы K2B разработала новые ряды ТК для ДСН. Они обеспечивают наддув, газовых двигателей и двигателей, работающих на тяжелом топливе, мощностью от 0,5 до 5 МВ при значениях ρ_k , достигающих 10.

Для ступени НД используется ТК с радиальной турбиной на основе ТК HPR или ST или вновь разработанный ТК HPA с осевой турбиной (рис. 2.1). Оптимизированные для работы на частичных нагрузках ТК HSR с радиальной турбиной используются для ступени ВД (рис. 2.2).

Ступени ВД и НД ДСН имеют следующие конструктивные особенности:

- новые проточные части компрессора и турбины, обеспечивающие оптимальное согласование ступеней НД и ВД, в том числе расширенные характеристики компрессора с высоким КПД для управления системой наддува;
- присоединительные размеры ТК НД, идентичные ОСН предшествующего поколения;
- специальные подшипники с увеличенным сроком службы и уплотнения с минимальным прорывом газов;

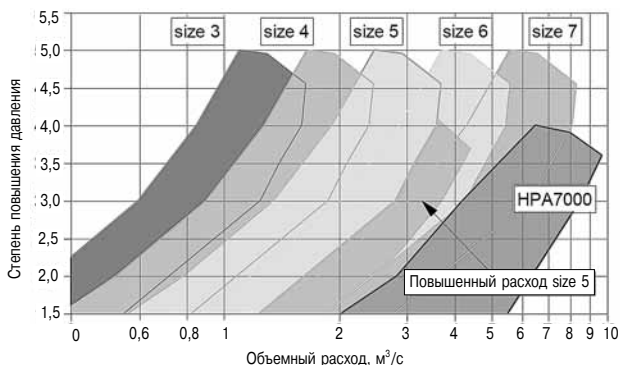


Рис. 2.1. Ряд ТК низкого давления с радиальной и осевой (HPA) турбинами для ДСН

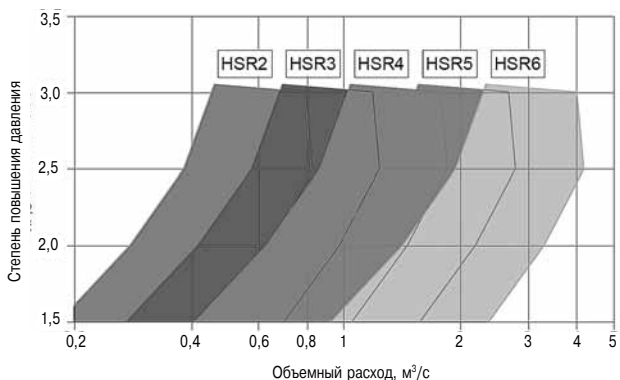


Рис. 2.2. Ряд ТК высокого давления с радиальной турбиной для ДСН

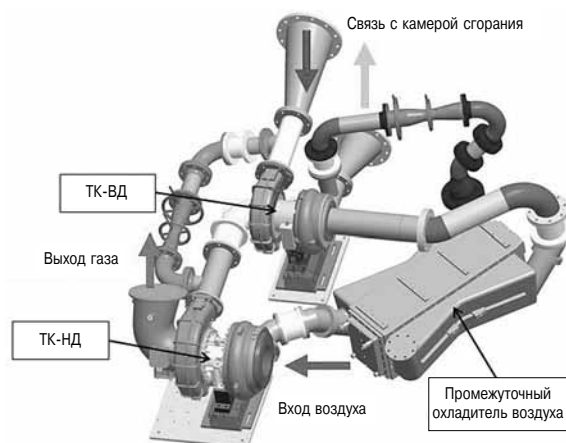


Рис. 2.3. Стенд для испытания турбокомпрессоров в двухступенчатой системе наддува

- неохлаждаемые корпуса подшипников (оптимальный вариант — охлаждаемый корпус);
- систему промывки турбины.

Для проверки характеристик и выполнения всесторонних испытаний на соответствие заданным техническим требованиям был введен в строй специальный стенд для испытаний ДСН (рис. 2.3). Стенд оборудован регулируемыми системами перепуска газов в компрессоре и турбине ТК высокого давления, что позволяет получить оптимальные эксплуатационные характеристики для основных применений ДСН на двигателях мощностью до 2 МВ. Кроме того, испытательный стенд обеспечивает возможность встраивания системы EGR.

Фирма KVB выполнила настройку ДСН на двигателе с помощью одномерного моделирования совместной работы двигателя с системой наддува по программе GT Power 1-D от фирмы «Gamma Technologies». Эта программа широко используется в мире и позволяет всесторонне оценить взаимодействие двигателя, ТК и элементов системы управления на постоянных и неустановившихся режимах.

Параметры двигателя и ДСН, использованные при моделировании

Параметр	Численное значение
Диаметр поршня, мм	365
Ход поршня, мм	420
Цилиндровая мощность, кВт/цил	650
Частота вращения, об/мин	750
Степень низкого давления	HPA7000
Степень высокого давления	HSR6
Система впрыска	Common Rail
Топливо:	
для контролируемой зоны эмиссии	MDO
для неконтролируемой	HFO

В качестве примера в докладе представлены результаты моделирования четырехтактного шестицилиндрового рядного двигателя.

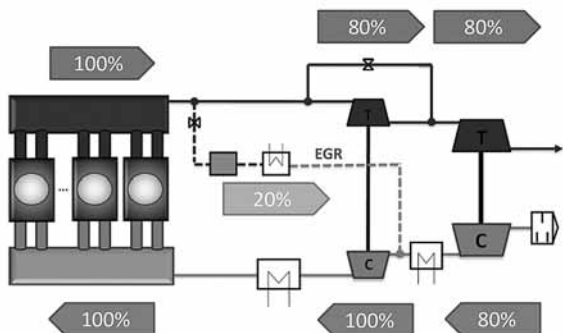


Рис. 2.4. Схема рециркуляции, принятая при моделировании

Двигатель может работать на тяжелом топливе или на легком топливе для среднеоборотных двигателей в зонах контролируемых выбросов (ЕСА).

На основании результатов моделирования установлено, что для выполнения требований ИМО Tier 3 требуется рециркуляция около 20 % отработавших газов при работе двигателя в зонах ЕСА. Рециркуляция выполняется по схеме, представленной на рис. 2.4. Газ на рециркуляцию отбирается перед турбиной ВД и подается на вход в компрессор ВД. Результаты моделирования в зависимости от величины рециркуляции 8–12 % дают возможность оптимальной настройки системы (рис. 2.5). Точки совместной работы ступеней компрессора НД и ВД с двигателем при различной величине рециркуляции демонстрируют

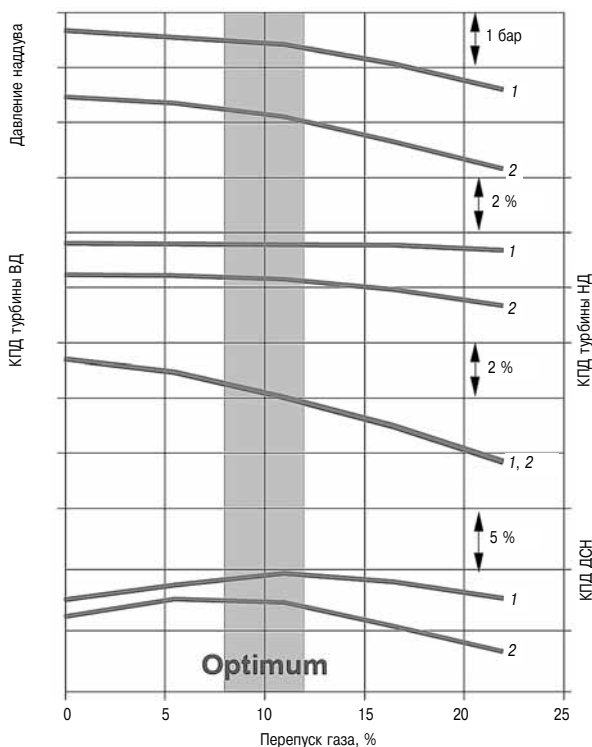


Рис. 2.5. Результаты моделирования при изменении величины перепускаемого газа:

1 — 100 %-ная нагрузка; 2 — 75 %-ная нагрузка

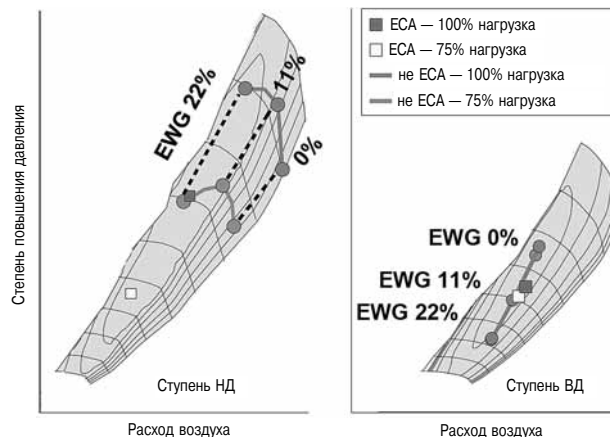


Рис. 2.6. Результаты моделирования — точки совместной работы ступеней ДСН с двигателем в зоне контролируемой и неконтролируемой эмиссии с различной величиной перепуска газа (EWG)

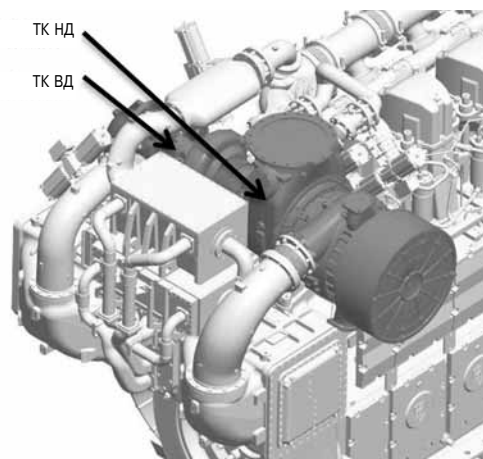


Рис. 2.7. Компоновка двухступенчатой системы наддува на двигателе

необходимость расширения широкой характеристики компрессора ступени НД (рис. 2.6).

ДСН представляет собой хорошо скомпонованный агрегат благодаря использованию осевой турбины (рис. 2.7). ТК HSR6 с радиальной турбиной используется как ступень ВД, а HPA7000 с осевой турбиной как ступень НД. Прямая подача газа в осевую турбину ТК НД от радиальной турбины ступени ВД является благоприятным фактором. Поступающий однородный поток гарантирует максимальный КПД турбины и минимизирует вероятность возбуждения вибраций в лопатках соплового аппарата и рабочего колеса. Перепуск газа предусмотрен на турбине ВД, чтобы управлять системой наддува.

Разработанная фирмой КВВ ДСН была реализована фирмой «Anglo Belgian Corporation» на шестицилиндровом рядном двигателе 6DL36 с указанными выше параметрами (рис. 2.8) [14].

Кроме схемы рециркуляции, представленной выше, фирма КВВ выполнила разработку специального EGR-турбокомпрессора (EGR-ТК)



Рис. 2.8. Прототип двигателя 6DL36

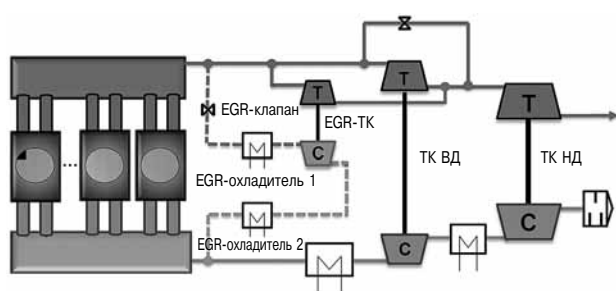


Рис. 2.9. Схема двигателя с двухступенчатой системой наддува и EGR-TK

(рис. 2.9). Компрессор EGR-TK используется для подачи газа на рециркуляцию и приводится в действие турбиной EGR-TK, которая работает на газах, непосредственно забираемых перед турбиной ВД и расширяющихся до уровня давления перед турбиной НД. В качестве EGR-TK может использоваться обычный ТК с адаптированной характеристикой турбины, так как степень повышения давления невелика, а давление после EGR-турбины достаточно велико. Правда возникают опасения, что КПД EGR-TK на частичных нагрузках будет очень низким.

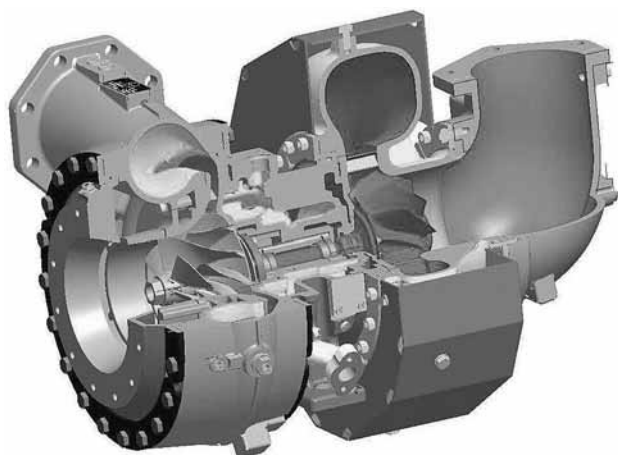


Рис. 3.1. Турбокомпрессор TCX14

ТСХ – новый турбокомпрессор высокого давления для двухступенчатой системы наддува [15]

Фирма PBS Turbo разработала ДСН среднего размера на основе серийного ТК TCR18 для ступени НД и нового ТК ТСХ14 (рис. 3.1) — ступени ВД с радиально-осевой турбиной [15].

Общая степень повышения давления в системе 6,1. По мнению авторов, самый высокий КПД системы достигается при равенстве степеней повышения давления в каждой ступени, но в ступени НД $\pi_{кнд}$ было увеличено, чтобы компенсировать потерю давления в промежуточном охладителе. В соответствии с этим $\pi_{кнд} = 2,62$, а $\pi_{квд} = 2,33$.

ТСХ14 создан на основе многолетнего опыта производства турбокомпрессоров TCR и NR с сохранением лопаточного диффузора и соплового аппарата. Проточные части компрессора и турбины были оптимизированы современными методами численного моделирования динамики жидкости и расчетов прочности методом конечных элементов. Изготовленные проточные части были испытаны на специальных стендах с подтверждением проектных характеристик.

Основные требования к компрессору ТСХ14 (рис. 3.2):

- максимальный КПД при степени повышения давления около 2,0;
- максимальная степень повышения давления 3,5;
- широкая характеристика компрессора, перекрывающая изменение массового расхода воздуха для использования различных методов управления давлением наддува при изменении нагрузки.

При проектировании турбины КПД был увеличен при сохранении высокой пропускной способности при низкой степени повышения давления. Были испытаны варианты колес тур-

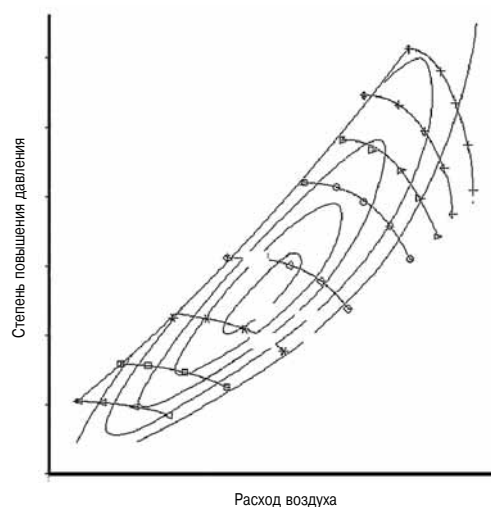


Рис. 3.2. Характеристика компрессора TCX14

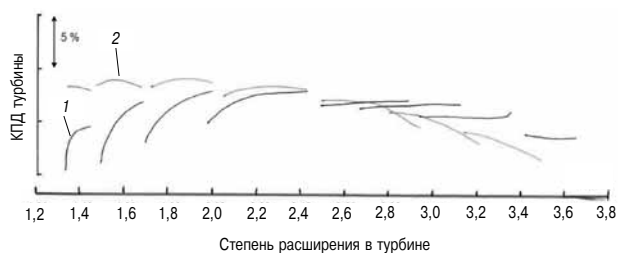


Рис. 3.3. КПД турбины с исходным колесом (1) и оптимизированным (2)

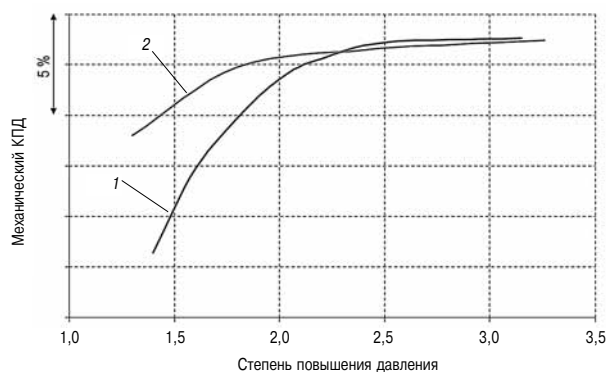


Рис. 3.4. Механический КПД турбокомпрессоров NR17/S (1) и TCX14 (2)

бины с различной геометрией лопаток и вариантами сопловых аппаратов, что позволило получить широкий диапазон характеристик турбины и оптимизировать ее проточную часть при более низких степенях повышения давления (рис. 3.3).

Турбокомпрессор ВД работает при сравнительно низких степенях повышения давления, поэтому его общий КПД зависит от механического КПД. Механический КПД на частичной нагрузке был повышен по сравнению со старым типом ТК, работающего с такой же степенью повышения давления (рис. 3.4). Небольшое ухудшение на высоких степенях повышения давления вызывается большим размером упорного подшипника, разработанного для принятия большей нагрузки.

Турбокомпрессор ВД имеет повышенные нагрузки на вал и подшипники. В результате последовательной оптимизации по динамике были разработаны ротор с относительно большой длиной и минимальным диаметром вала (рис. 3.5)



Рис. 3.5. Ротор турбокомпрессора TCX14

и плавающие подшипники с устойчивым режимом работы.

Результаты моделирования испытаний показали устойчивое движение ротора во всем диапазоне рабочих скоростей с малыми перемещениями ротора относительно зазора в подшипнике.

Для устранения протечек при высоком перепаде давлений уплотнения ротора выполнены в виде поршневых колец, высокая надежность которого подтверждена испытаниями.

Турбокомпрессор ВД в ДСН работает при высоких температурах, поэтому корпус подшипников охлаждается водой для гарантии высокой надежности при всех применениях двигателя. Корпус подшипников был проверен на устойчивость динамическому возбуждению, вызванному колебаниями, исходящими от двигателя. Моделирование прочностных характеристик было выполнено с помощью Ansys module «Random Vibration (PSD) analysis». Результаты моделирования подтвердили, что максимальная нагрузка значительно ниже предела текучести используемых материалов.

Корпуса компрессора и турбины соединяются корпусом подшипников с помощью прижимных накладок, что позволяет установить их в любое положение. Прижимные накладки гарантируют, что фланцы прижаты и герметичность обеспечена. Высокий уровень напряжений во фланцах является причиной их массивности, а высокий уровень давлений вызывает увеличенную толщину стенок улиток.

Конструкция корпуса компрессора предусматривает возможность рециркуляции для более устойчивой работы компрессора. Деформация корпуса компрессора была проверена в рабочих условиях. В области колеса компрессора она максимальная, но влияние изменения зазоров в проточной части не оказывает влияния на КПД компрессора.

Корпус турбины — одна из самых нагруженных деталей. В дополнение к давлению, вибрации и внешним силам возникает тепловая нагрузка, создающая высокие напряжения, особенно при работе на неустановившихся режимах, когда большая разность температур создает дополнительную нагрузку на корпус.

Разность температур нагружает не только корпус, но также деформируют колесо турбины и фланцы. При деформации последних могут возникнуть проблемы с плотностью. Соединение корпуса турбины с корпусом подшипников является критическим, потому что оно должно компенсировать относительное перемещение частей с различными температурами и тепловым расширением с одновременным сохранением

плотности соединения. Надежность соединения корпусов была проверена поэтапным моделированием, включая оценку низкоцикловой усталости LCF, выполненной в результате нескольких циклов оптимизации в области с наибольшей разностью температур.

Безопасность конструкции ТК при разрыве ротора была проверена моделированием.

Осевая сила была измерена непосредственно на стенде. Результаты испытаний показали, что реальная нагрузка оказалась меньше, чем было предсказано моделированием, что дало возможность уменьшить механические потери за счет уменьшения размера упорного подшипника.

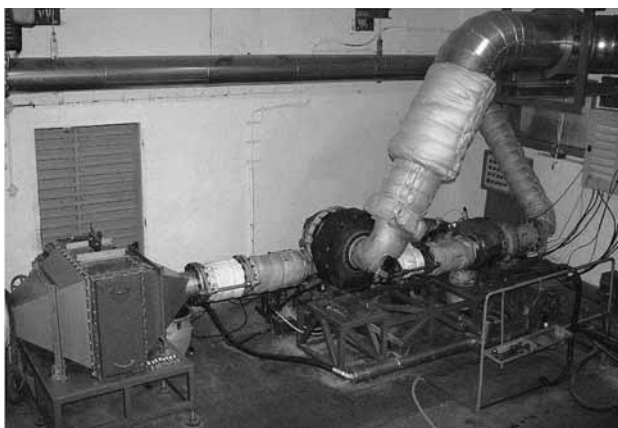


Рис. 3.6. Стенд для испытания двухступенчатой системы наддува

Основные термодинамические испытания были проведены на одной ступени. Функциональные возможности турбокомпрессора ВД для подтверждения надежности подшипников и уплотнений ротора, проверки плотности фланцев и жесткости корпусов и оценки КПД ДСН были проведены на новом испытательном стенде на максимальную степень повышения давления π_k (рис. 3.6)

Современные четырехтактные дизели фирмы Wartsila [16]

Фирма «Wartsila» ведет исследования по снижению NO_x с ДСН на различных опытных двигателях, начиная с 2006 г. (рис. 4.1) [16]. Испытания ДСН в комбинации с другими технологиями, такими как EGR и SCR, выполнялись на опытном двигателе 6L20, а первая промышленная ДСН на двигателе W20V32 была проверена в эксплуатации.

Результаты исследования показали, что ДСН, помимо снижения NO_x , позволяет:

- снизить удельный расход топлива благодаря высокому КПД системы (рис. 4.2);
- повысить форсировку и удельную мощность благодаря высокому давлению наддува;



Рис. 4.1. Хронология испытаний двухступенчатых систем наддува на двигателях фирмы «Wartsila»

➤ работать на полной мощности при повышенной температуре окружающей среды благодаря большому запасу ДСН по диапазону работы.

Исследования на базе двигателя W6L46 с ДСН обеспечили создание базы для будущих поколений двигателей. Особенностью двигателя W6L46 является современная ДСН с максимальным КПД больше 75 % — последнее поколение топливной системы с многократным впрыском и давлением впрыска 2000 бар и регулируемым клапаном впуска для оптимальной настройки на частичные нагрузки.

Соответствие эмиссии NO_x уровню IMO Tier 2 было подтверждено испытаниями длительностью более 1000 часов на опытном двигателе в 2012 г. Силовая установка показала возможность увеличения мощности примерно на 20 % при улучшении эффективности двигателя в диапазоне средних и высоких нагрузок на ~6 % (рис. 4.3). Рабочие показатели были достигнуты при выполнении всех ограничений по термической нагрузке и максимальному давлению сгорания.

В 2013 г. продолжались работы по оптимизации двигателя к требованиям IMO Tier 3 с использованием наиболее перспективных концепций (SCR и EGR в комбинации с ДСН).

При разработке ДСН особое внимание было уделено ее конструктивному исполнению:

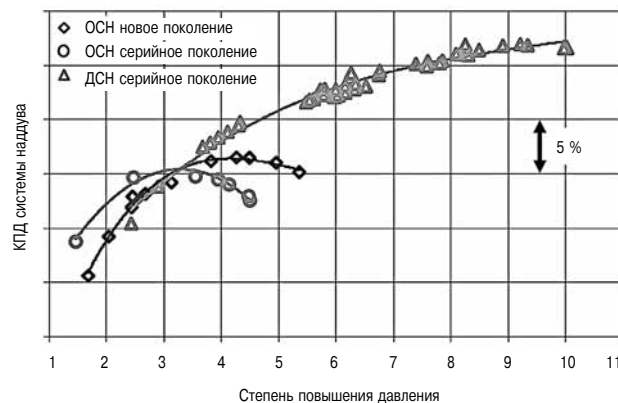


Рис. 4.2. КПД систем двух- и одноступенчатого наддува

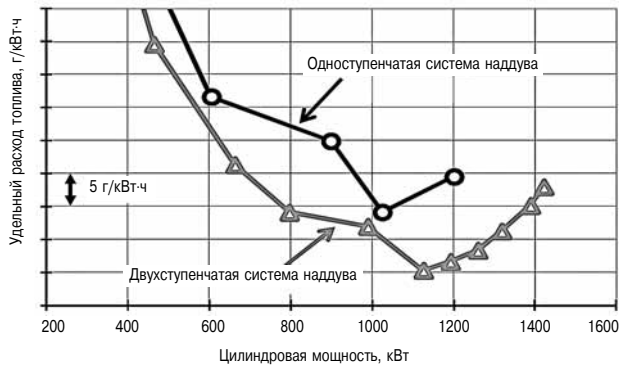
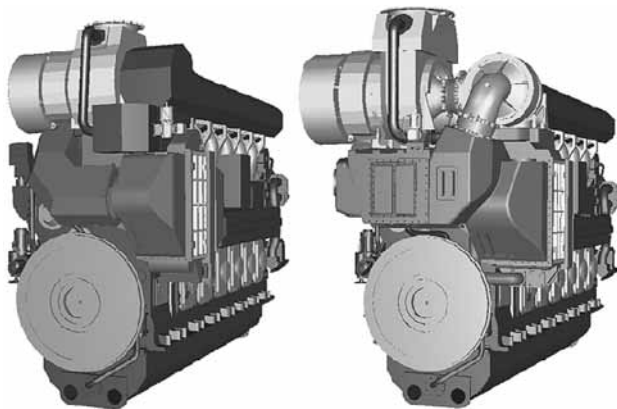


Рис. 4.3. Результаты испытаний двигателя фирмы «Wartsila» 6L46 с двухступенчатой системой наддува

- все элементы системы наддува должны размещаться на двигателе;
- должны быть обеспечены компактные размеры двигателя с одновременным сохранением удобства обслуживания и хорошей эксплуатационной надежностью;



Увеличение габарита ОСН→ДСН	Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм	Отношение масс
	500	650	0	1,6

Рис. 4.4. Сравнение компоновки ДСН с ОСН

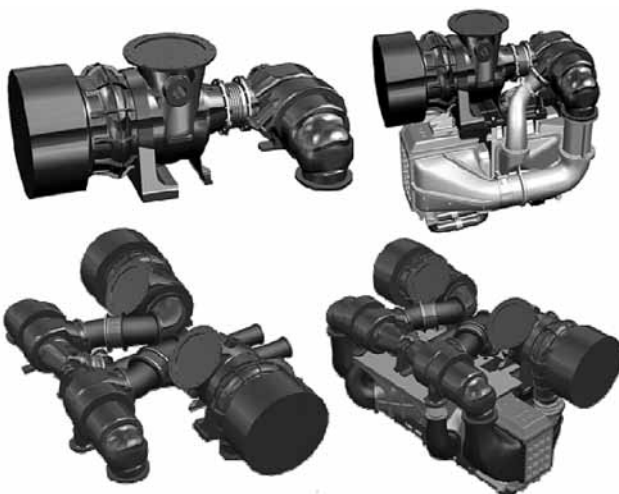


Рис. 4.5. Возможные компоновки двухступенчатой системы наддува

➤ должны быть предусмотрены необходимые средства управления (воздух / газ / охлаждающая вода) в пределах вышеупомянутого габарита.

В выбранной компоновке все элементы системы наддува размещены на стороне привода двигателя. Охладитель ТК ВД размещен на боковой стороне двигателя. Эта компоновка — лучшая по эффективности системы наддува, компактности двигателя и с точки зрения стоимости. Турбокомпрессоры ориентированы перпендикулярно друг другу, что позволяет соединить ТК по газовым трактам с минимальными потерями. Такая компоновка обеспечивает удобство обслуживания практически такое же, как на двигателе с ОСН. При этом остается свободным другой конец двигателя, доступный для размещения элементов других устройств, в том числе которые потребуются в будущем для снижения эмиссии NO_x . На рис. 4.4 приведено сравнение компоновок ДСН и ОСН для одного того же двигателя.

Для обеспечения требований по выбросам NO_x на двигателе W6L46 с ДСН используется трехступенчатый регулируемый впускной клапан (VIC). Надежность и эффективность системы подтверждена тысячами часов работы в эксплуатации.

Основываясь на проектах ДСН для двигателей W20V32 и W6L46 2, фирма «Wartsila» выполнила оптимальные компоновки на V-образных и рядных двигателях. Эти компоновки системы наддува пригодны для будущих моделей среднеоборотных дизелей и газовых двигателей среднего размера (рис. 4.5).

Вклад системы наддува в улучшение экономичности двухтактных малооборотных двигателей [17]

Основываясь на имеющемся опыте и результатах моделирования, фирма АВВ оценила возможности ДСН на двухтактных двигателях. Теоретический анализ показывает, что доступность высокого КПД ДСН не позволяет увеличить давление продувочного воздуха при постоянном отношении максимального давления сгорания к среднему эффективному давлению. В отличие от четырехтактного двигателя, в двухтактном потери цикла Миллера не компенсируются положительной работой поршня. Исходя из этого, представлено два варианта применения ДСН.

Первый вариант — турбокомпаундная система с силовой турбиной при умеренной форсировке. Эта система позволяет обеспечить максимальное снижение расхода топлива во всех сопоставимых случаях. Однако согласно оценкам коммерческих проектов, реализуемых в прошлом с силовой турбиной, первоначальные затраты ожидаются очень высокими, а сроки окупаемости длительными.

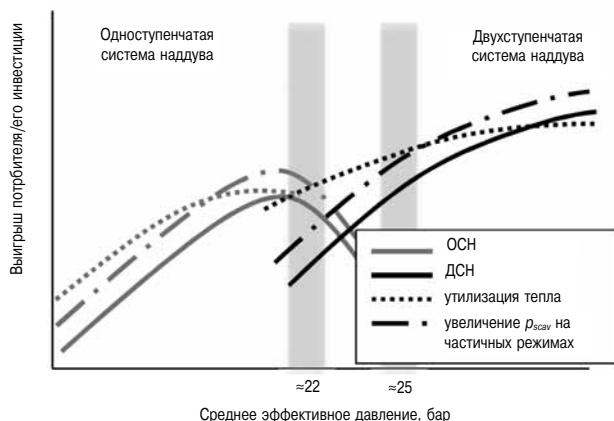


Рис. 5.1. Привлекательность инвестиций в зависимости от среднего эффективного давления

Второй вариант — чрезвычайно высокий уровень форсировки двигателя до 30 бар с соответствующим снижением размеров цилиндропоршневой группы. Этот вариант позволяет создать двигатель меньшего размера с определенным снижением расхода топлива, но при значительном сокращении остаточной энергии, доступной для работы котлов, утилизирующих теплоту отработавших газов.

Выполнение требований IMO Tier 3 для обоих вариантов может быть достигнуто использованием имеющихся методов сокращения эмиссии NO_x .

Возможность использования ДСН на двухтактном двигателе определится рентабельностью этих систем в эксплуатации в зависимости от первоначальных затрат на систему утилизации тепла, цены на топливо и профиля нагрузок двигателя. Это может быть качественно представлено в виде диаграммы (рис. 5.1), показывающей рентабельность (выигрыш, отнесенный к затратам на систему наддува) в зависимости от p_{me} . На определенном уровне p_{me} рентабельность для ОСН снижается, потому что требования к степени повышения давления и КПД не могут быть удовлетворены. ДСН позволяет эти требования выполнить, в частности, за счет увеличения давления продувки на частичных нагрузках, и поэтому, несмотря на высокую стоимость системы, у заказчика появляется заинтересованность в этой системе при высоком уровне p_{me} .

Двигатели MTU серии 1163-04 [18]

Фирма MTU — единственная, кто представил сообщение об использовании ДСН на быстроходных дизелях. Новое поколение двигателей 1163-04 ($D/S = 230/280$ мм) в диапазоне мощностей от 6000 до 7400 кВт (p_{me} от 24,8 до 28,8 бар) при частоте вращения коленвала от 1250 до 1325 об/мин представлено на рынок. Давление наддува увеличено с 4,6 бара до 5,7 бар со снижением удельного расхода топлива на 8 % при

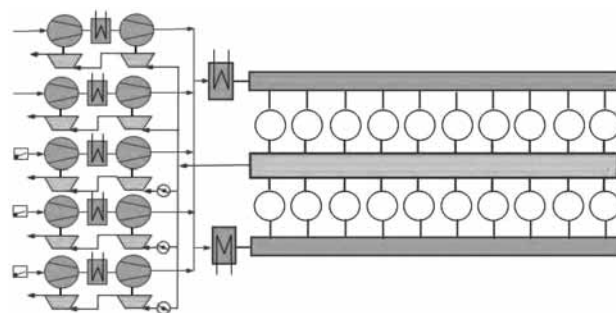


Рис. 6.1. Схема наддува 20-цилиндрового двигателя фирмы MTU серии 1163-04

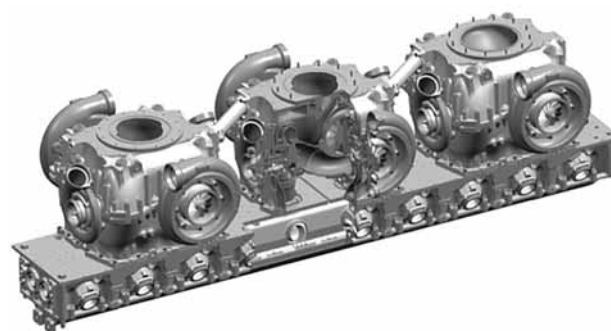


Рис. 6.2. Компоновка ДСН на 20-цилиндровом двигателе

соответствии требованиям по эмиссии NO_x IMO Tier 2. Принципиальная схема наддува 20-цилиндрового двигателя показана на рис. 6.1.

Группа из двух турбокомпрессоров НД и ВД обслуживает четыре цилиндра. Весь мощный ряд двигателей оборудован идентичными ТК (12V — 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 конструкции охлаждаемых корпусов и встраиванием газоподводящих корпусов ТК в выпускной коллектор постоянного давления (рис. 6.2).

Заключение

1. Двухступенчатая система наддува (ДСН) относится к наиболее эффективным средствам улучшения топливной экономичности двигателей и снижения эмиссии NO_x . Благодаря разработке новых проточных частей компрессоров и турбин, достигнута общая степень повышения давления $\pi_k = 12$ при КПД около 80 %. В этом случае степень повышения давления в ступени высокого давления близка к максимальной, равной 4, а в ступени низкого давления с π_k до 3,0 имеется возможность получить достаточно широкую характеристику компрессора, необходимую для управления системой. Дальнейшее повышение π_k в ДСН ограничено при условии сохранения высокого КПД.

2. Результаты моделирования показывают, что использование возможностей цикла Миллера и ДСН при $\pi_k = 12$ и КПД до 80 % позволяет снизить эмиссию NO_x на 70 %, а расход топлива на 9 %, что не обеспечивает требования IMO Tier 3, для чего необходимы системы EGR или очистки газов.

3. По имеющимся опубликованным данным можно предположить, что ДСН с рециркуляцией около 20 % охлажденного отработавшего газа сможет обеспечить требования по эмиссии NO_x IMO Tier 3 без ухудшения топливной экономичности [11, 13, 22].

4. В связи с необходимостью обеспечить требования по выбросам NO_x IMO Tier 3 широким фронтом ведутся работы по созданию ДСН с системами EGR для судовых среднеоборотных дизелей и газовых двигателей с диаметром цилиндров от 300 до 500 мм. Фирма ABB разработала ДСН второго поколения Power2 800-M [12], ориентированную на двигатели фирмы «Wartsila» [16]. Фирма KBB разработала новые ряды ТК для ДСН, адаптированные к применению на газовых двигателях и дизелях, работающих на тяжелом топливе, мощностью от 0,5 до 5 МВ [13, 14].

5. Анализ различных схем компоновки ДСН и проточных частей ступеней высокого и низкого давления, объединенных в одном агрегате, показал, что наиболее эффективным конструктивным решением является компоновка двумя отдельными ТК. Это позволяет организовать их производство на имеющиеся производственных мощностях и сохранить удобство обслуживания.

6. Первые серийные двигатели с ДСН находятся в опытной эксплуатации для подтверждения заявленных технических характеристик. Результаты испытаний демонстрируют, что двухступенчатая система наддува — атрибут современного среднеоборотного двигателя.

7. В тенденциях развития современного двигателестроения, направленных на снижение удельного расхода топлива и повышение форсировки при соблюдении норм по эмиссии NO_x отмечается, что при переходе к ДСН с $\pi_k = 6$ достигнуты значения $p_{me} = 24\text{--}26$ бар, а при $\pi_k = 12$ $p_{me} = 27\text{--}28$ бар.

Для газовых двигателей, как показали результаты моделирования, выполненного фирмой AVL, ДСН позволяет увеличить p_{me} с 22 до 26 бар [21].

8. На двухтактных малооборотных двигателях применение ДСН совместно с силовой турбиной при умеренной форсировке позволяет значительно снизить расход топлива, но использование такой системы наддува определяется ее рентабельностью в связи с высокой начальной стоимостью.

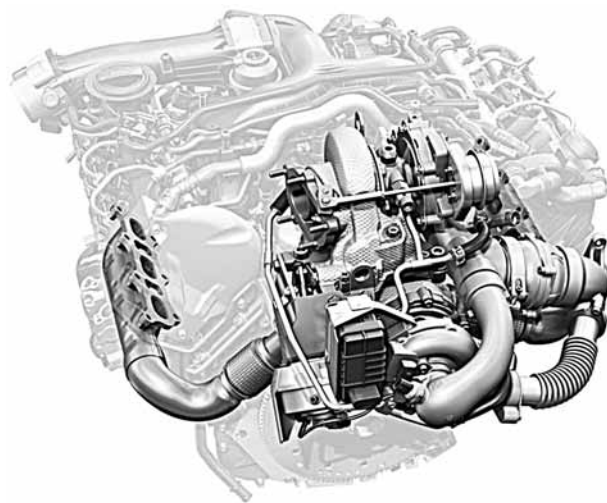


Рис. 7.2. Двухступенчатый ТК фирмы «Honeywell»

9. Анализ тиоразмерных рядов и параметров ТК ведущих фирм-производителей показывает, что наметилась тенденция разработки и применения ТК с радиальной турбиной со средними размерами рабочих колес 140–190 мм. Это позволяет фирмам, выпускающим ТК для двигателей судового, железнодорожного и стационарного применения больших мощностей (ABB, MAN B&W, PVB Turbo, KBB и др.), использовать разработанные ДСН в быстроходных двигателях.

Фирмы, выпускающие ТК для автотракторной промышленности («Honeywell» (Garrett), «Borg» «Warner», «Holset», «Mitsubishi», «Ishikawajima-Harima» (IHI), «Kangyue» и др.), ведут разработки в направлении увеличения типоразмера агрегатов наддува. Поэтому когда-то существовавший разрыв в полях расхода воздуха теперь отсутствует. При этом разработки, выполненные в автотракторной промышленности, могут быть успешно применены при создании ДСН с EGR на двигателях внедорожного применения. Эти ТК

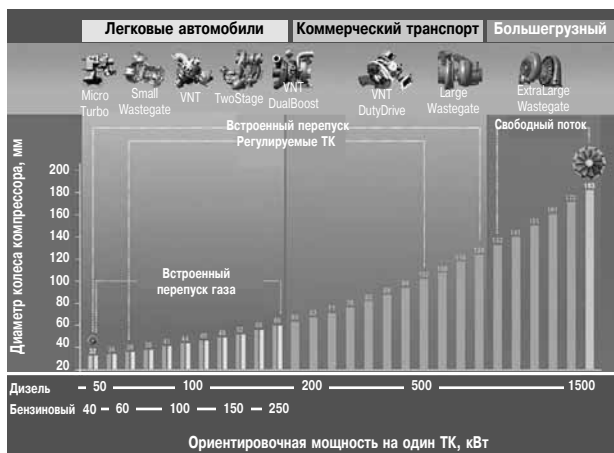


Рис. 7.1. Типы и мощностной диапазон ТК фирмы «Honeywell»

имеют перепуск воздуха и газа, что необходимо для управления системой наддува. Диапазон перекрываемых мощностей и типов ТК фирмы «Honeywell» приведен на рис. 7.1 [19]. Следует отметить, что фирма «Honeywell» выпускает серийные двухступенчатые ТК для бензиновых двигателей литражом 1,5–3,0 и мощностью 150–250 кВт и дизелей внедорожного применения мощностью до 1500 кВт (рис. 7.2) [20].

Литература

1. *Codan E., Bernasconi S., Born H.* IMO III Emission Regulation: Impact on the Turbocharging System. Paper № 139, CIMAC 2007, Vienna.
2. *Wik C., Hallback B.* Utilisation of 2-stage turbo charging as an emission reduction mean on a Wartsila 4-stroke medium-speed diesel engine. Paper № 101, CIMAC 2007, Vienna.
3. *Ципленкин Г.Е., Дейч Р.С., Иовлев В.И., Коженков А.А.* Обзор докладов по газотурбинному наддуву на конгрессе CIMAC 2007 // Двигателестроение. — 2008. — № 1. — С. 26–30.
4. *Codan E., Mathey C., Rettig A.* 2-Stage Turbocharging — Flexibility for Engine Optimisation. Paper № 293, CIMAC 2010, Bergen.
5. *Ципленкин Г.Е., Иовлев В.И., Сухарев А.Н.* Двухступенчатый наддув — атрибут двигателя будущего. Двигателестроение. — 201 — №. — С. .
6. *Raikio T., Hallback B., Hjort A.* Design and first application of a 2-stage turbocharging system for a medium-speed diesel engine. Paper № 82, CIMAC 2010, Bergen.
7. *Heim K., Troberg M., Ollus R., Vaarasto M.* Latest developments in Wartsila's medium-speed engine portfolio. Paper № 206, CIMAC 2010, Bergen
8. *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.
9. *Wintruff I., Buecheler O., Huchler S.* The next generation of MTU series 4000 rail engines to comply with EUIII emission legislation. Paper № 211, CIMAC 2010, Bergen.
10. *Dohle U.* MTU Solutions for Meeting Future Exhaust Emissions Regulations. Paper № 284, CIMAC 2010, Bergen.
11. *Schlemmer-Kelling U.* EMI MIN — A Government funded Research Program to reduce Emissions. Paper № 91, CIMAC 2010, Bergen.
12. *Behr T., Kahi M., Reichl A., Hubacher M.* Second generation of two-stage turbocharging Power2 systems for medium speed gas and diesel Engines. Paper № 134, CIMAC 2013, Shanghai.
13. *Risse S., Buchmann K.* New turbochargers for modern large engines with low emissions and high performance. Paper № 226, CIMAC 2013, Shanghai.
14. *Lieven Vervaeke L., Tim Berckmoes T., Sebastian Verhelst S.* The CRISTAL engine: ABC's new medium speed diesel engine, developed to comply with IMO III. Paper № 83, CIMAC 2013, Shanghai.
15. *Klima J., Hort V., Haidn M.* TCX — the new high pressure turbocharger for two stage turbocharging. Paper № 206, CIMAC 2013, Shanghai.
16. *Ollus R.B., Raikio T., Suominen A., Akerman J., Tonon P., Delneri D., Bochicchio A.* Update on Wartsila 4-stroke Diesel Product Development. Paper № 282, CIMAC 2013, Shanghai.
17. *Schuermann P., Hubacher M., Christen C., Ryser R., Codan E.* Contribution of Turbocharging Solutions towards improved Fuel Efficiency of Two-Stroke Low Speed Engines. Paper № 209, CIMAC 2013, Shanghai.
18. *Kurreck M., Werner Remmels W.* Series 1163-04. Paper № 112, CIMAC 2013, Shanghai.
19. <http://turbo.honeywell.com/our-technologies/broadest-turbo-range/>.
20. <http://turbo.honeywell.com/our-technologies/two-stage-serial-turbo/>.
21. *Murakami S., Baufeld T.* Current Status and Future Strategies of Gas Engine Development. Paper № 413, CIMAC 2013, Shanghai.
22. *Millo F., Bernardi M. G., Servetto E., Delneri D.* Computational Analysis of Different EGR systems Combined with Miller Cycle Concept for a Medium Speed Marine Diesel Engine. Paper № 74, CIMAC 2013, Shanghai.