

## РАЗВИТИЕ СИСТЕМ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО НАДДУВА ДВИГАТЕЛЕЙ

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

Выполнен обзор и анализ развития систем двухступенчатого наддува (ДСН) четырех- и двухтактных двигателей различного применения. Показано, что системы ДСН для этих 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  $\text{NO}_x$  оценивается величиной 40 %, в то время как в двухтактных эффект применения ДСН выражается в снижении расхода топлива на 2–5 г/кВт·ч.

Исследования систем двухступенчатого наддува (ДСН), представленные в докладах конгресса СИМАС, довольно подробно освещены в статьях [1–3]. В настоящем обзоре дан краткий перечень и анализ ранее выполненных ведущими мировыми производителями ТК работ по развитию систем ДСН.

### 1. ABB Turbo Systems Ltd

#### Новые требования к турбокомпрессорам для снижения вредных выбросов [4] (СИМАС 2007)

Для оценки потенциальных возможностей систем ДСН фирма АВВ выполнила моделирование и проанализировала различные варианты циклов Миллера с высоким давлением наддува. Анализ показал, что в современном двигателе есть возможность снижения удельного расхода топлива на 10 %, и выбросов окислов азота на 40 %. Выполнено исследование изменения среднего эф-

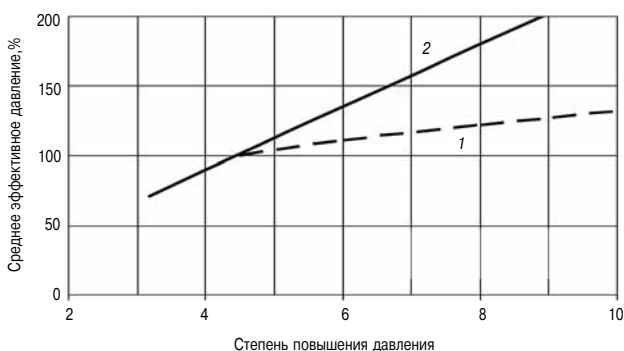


Рис. 1.1. Изменение среднего эффективного давления в зависимости от степени повышения давления в двигателе с циклом Миллера (1) и без него (2)

фективного давления в зависимости от степени повышения давления в двигателе с циклом Миллера и без него (рис. 1.1).

#### СИМАС 2010. Влияние на систему наддува требований ИМО Tier III [5]

Фирма АВВ выполнила краткий обзор технологий снижения выбросов  $\text{NO}_x$  и проанализировала возможности достижения требований ИМО Tier III методами моделирования работы систем каталитического восстановления (SCR) и рециркуляции отработавших газов (EGR) при использовании ДСН.

#### СИМАС 2010. Двухступенчатый наддув — оптимальная адаптация двигателя [6]

Рассмотрен комплекс вопросов оптимальной адаптации ДСН к условиям работы среднеоборотного двигателя (СОД) со средним эффективным давлением  $p_{me} = 24$  бар. Соотношение между  $p_{me}$  и требуемым давлением наддува установлено методами моделирования. Результаты расчетов показали, что выбросы  $\text{NO}_x$  снижаются линейно с ростом  $\pi_k$ , а удельный расход топлива имеет четкий минимум, соответствующий значению  $\pi_k = 7$ . Выполнена оценка оптимального распределения  $\pi_k$  между ступенями низкого давления (НД) и высокого давления (ВД) для получения максимального КПД системы и поэтапный параметрический анализ возможности снижения расхода топлива и выбросов  $\text{NO}_x$  при переходе от одноступенчатой системы наддува (ОСН) к ДСН.

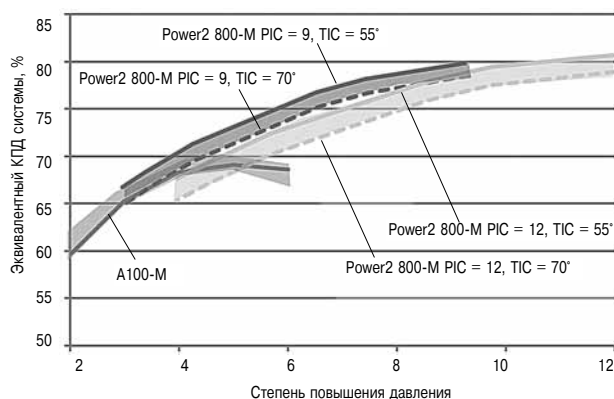


Рис. 1.2. Зависимость КПД системы Power2 800-M от степени повышения давления при температуре воздуха 55 и 70 °C на выходе из межступенчатого охладителя

**СИМАС 2013. Второе поколение двухступенчатой системы наддува для среднеоборотных газовых и дизельных двигателей [7]**

Исходя из требований высокой форсировки и соблюдения норм выбросов  $\text{NO}_x$ , фирма разработала систему ДСН второго поколения Power2 800-М, состоящую из двух отдельных турбокомпрессоров (ТК). ДСН обеспечивает общую степень повышения давления до 12 и КПД до 80 % (рис. 1.2).

ДСН включает четыре типоразмера ТК для наддува СОД с размерами цилиндра от 300 до 500 мм. Турбокомпрессоры как ВД, так и НД выполнены с осевыми турбинами, для достижения требуемых больших расходов и обеспечения оптимальной компоновки на двигателе. Приведены характеристики компрессоров и турбин для ступеней ВД и НД в относительных параметрах, для турбин даны абсолютные значения КПД.

Продолжен анализ взаимодействия системы ДСН с технологиями снижения выбросов  $\text{NO}_x$  до уровня требований ИМО Tier III.

**СИМАС 2013. Вклад системы наддува в улучшение экономичности двухтактных малооборотных двигателей [8]**

Основываясь на имеющемся опыте и результатах моделирования, фирма АВВ оценила возможности применения ДСН в двухтактных двигателях. Теоретический анализ показывает, что располагаемый высокий КПД системы ДСН не позволяет увеличить давление продувочного воздуха при постоянном отношении максимального давления сгорания и  $p_{me}$ . В отличие от четырехтактного в двухтактном двигателе потери цикла Миллера не компенсируются положительной работой поршня. Исходя из этого представлено два возможных варианта применения ДСН.

Первый вариант — турбокомпаундная система с силовой турбиной (СТ) для двигателей с умеренной форсировкой. Эта система позволяет максимально снизить расход топлива во всех сопоставимых вариантах. Однако оценка эффективности коммерческих проектов, реализованных в прошлом с силовой турбиной, показала, что первоначальные затраты ожидаются высокими, а сроки окупаемости — длительными.

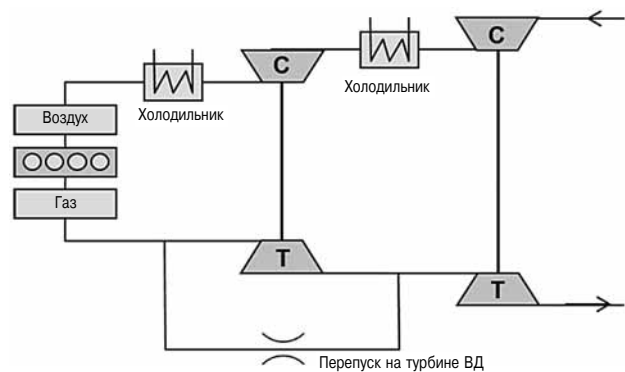
Второй вариант — для двигателей с высоким уровнем форсировки (30 бар) с соответствующим снижением размеров цилиндропоршневой группы. Реализация варианта позволяет снизить расход топлива, но существенно сокращает остаточную энергию, доступную для работы котлов-утилизаторов.

**СИМАС 2016. Представляет ли интерес двухступенчатый наддув для двухтактных двигателей? [9]**

Двухтактные малооборотные двигатели (МОД) являются главными силовыми установками для крупных коммерческих судов. К их преимуществам относятся прямой привод винта без редуктора и максимально достижимый КПД. Но использование ДСН для повышения их эффективности до сих пор находится в стадии теоретических разработок.

ДСН характеризуется более резким падением КПД турбокомпрессора в сопоставлении с ОСН при работе на частичных нагрузках. Причина состоит во влиянии на КПД ДСН промежуточного охлаждения при низких степенях  $\pi_k$  и уменьшающегося отношения давлений в ступени низкого (НД) и высокого давления (ВД) (коэффициент распределения давлений между ступенями). Снижение влияния промежуточного охлаждения достигается уменьшением разности температур на выходе из ступени НД и из промежуточного охлаждения при работе на частичной нагрузке. Снижение коэффициента распределения давлений определяется характеристиками турбин. Распределение  $\pi_k$  между ступенями желательно устанавливать несколько выше оптимума, который имеет значения в интервале от 1,5 до 1,75 для типичных температур промежуточного охлаждения воздуха от 60 до 70 °С.

Для оптимизации параметров работы ДСН на частичной нагрузке используется перепуск ОГ на турбине ВД, что позволяет регулировать степень повышения давления двух ступеней компрессора и коэффициент распределения давлений между ними (рис. 1.3). Система наддува, настроенная на частичную нагрузку, обеспечивает более высокий коэффициент распределения давлений, чем при полной нагрузке. При этом перепуск на турбине ВД выполнятся только при полной



**Рис. 1.3. Двухступенчатая система наддува с перепуском на турбине высокого давления**

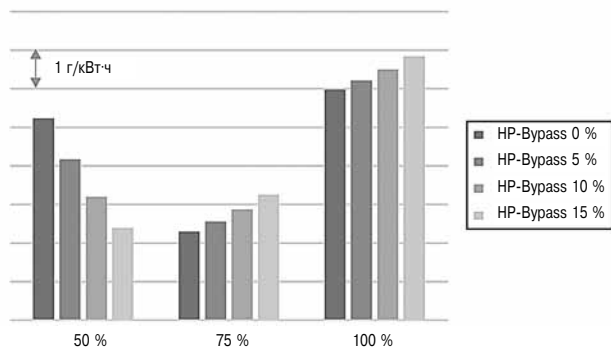


Рис. 1.4. Влияние на топливную экономичность перепуска газа на турбине высокого давления

нагрузке. При низких и средних нагрузках перепуск закрыт. Система работает подобно ОСН с тем отличием, что ОГ перепуска поступает в турбину низкого давления (НД).

Поскольку турбина ВД должна работать с тем же самым коэффициентом расширения на режимах с перепуском, пропускная способность турбины должна быть соответственно уменьшена. На режимах с закрытым перепуском меньшая пропускная способность турбины ВД создает дополнительное давление наддува. Результаты моделирования показали, что перепуск, равный 15 % на режиме 50 % от номинала, улучшает топливную экономичность на 2–3 г/кВт·ч с потерей экономичности в 1 г/кВт·ч на номинальной мощности (рис. 1.4).

Увеличение степени повышения давления компрессора и КПД турбокомпрессора использовалось на МОД для увеличения  $p_{me}$  при одновременном снижении высоты продувочных окон (ПО). Более низкая высота ПО позволяет увеличить ход расширения и улучшить топливную экономичность. При этом процесс продувки укорачивается, но потеря воздушного заряда компенсируется увеличением давления наддува при повышенном КПД турбокомпрессора. На

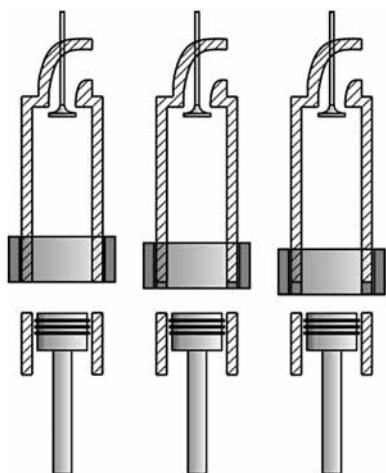


Рис. 1.5. Изменение высоты впускного окна механизмом пиноли

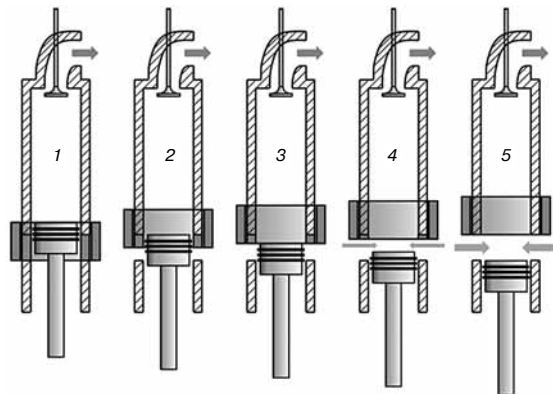


Рис. 1.6. Асимметричное открытие продувочного окна. Последовательность процедур открытия продувочного окна:

1 — выпускной клапан полностью открыт; 2 — край поршня достигает верхнего конца впускного отверстия. 3 — край пиноли достигает края поршня; 4 — ПО, частично покрытые пинолью; начинается продувка; 5 — ПО полностью открыты

средних нагрузках двигателя обычно имеется избыточный КПД турбокомпрессора в сопоставлении с предельной нагрузкой. Это дает возможность снизить высоту ПО настолько, насколько позволяет располагаемый КПД турбокомпрессора на каждом режиме работы.

Таким образом, для повышения экономичности на долевых режимах требуется управление открытием и закрытием ПО. Рассматриваются два метода изменения фаз открытия и закрытия ПО, которые обеспечивают продолжительное расширение при сохранении достаточной продолжительности продувки для очистки цилиндра. Первый метод дает возможность сохранить симметричность фаз открытия и закрытия продувочного окна при изменении его высоты на различных нагрузках (рис. 1.5). Во втором методе используется асимметрия фаз открытия и закрытия впускных окон (рис. 1.6). Возможна комбинация обоих методов, так как оба они строятся на одинаковом принципе действия. Для реализации регулируемых фаз открытия и закрытия ПО в со-

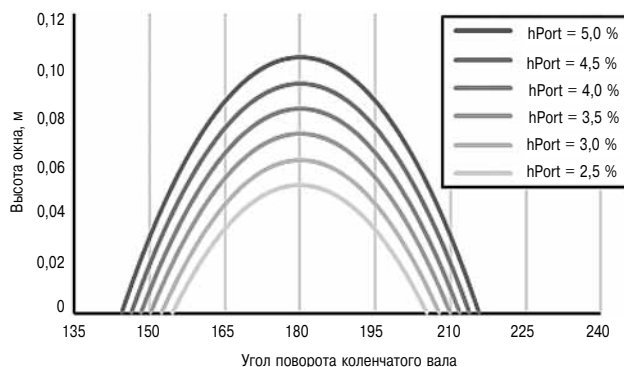


Рис. 1.7. Изменение высоты ПО при их симметричном открытии

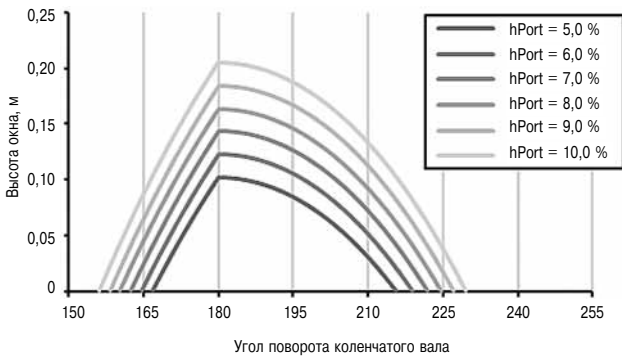


Рис. 1.8. Изменение высоты ПО при их асимметричном открытии

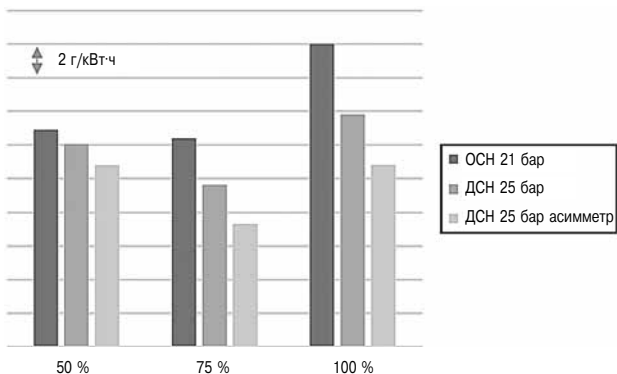


Рис. 1.9. Сопоставление удельного расхода топлива при ОСН и ДСН

ответствии с патентом [10] предлагается введение пиноли (золотника), способного закрыть полностью высоту ПО в пределах гильзы цилиндра.

Для изменения высоты ПО требуется исполнительный механизм. При асимметричном открытии ПО необходимо перемещать пиноль со скоростью, превышающей скорость поршня. Пиноль и поршень движутся в противоположных направлениях. ПО начинают открываться после того, когда края поршня и пиноли совмещаются.

Изменение высоты ПО при симметричном и асимметричном их открытии приведены на рис. 1.7 и 1.8.

Результаты моделирования, выполненного для МОД с диаметром цилиндра 50 см и  $p_{me} = 25$  бар, показали, что использование системы ДСН с асимметричным открытием ПО позволяет снизить расход топлива на 2–7 г/кВт·ч в диапазоне нагрузок 50–100 % от номинала по сравнению с ОСН при  $p_{me} = 21$  бар (рис. 1.9).

## 2. Wartsila, Wartsila Corporation Research & Development

**СИМАС 2007. Использование двухступенчатой системы наддува для снижения выбросов на четырехтактных среднеоборотных дизелях [11]**

Фирма «Wartsila» оценила преимущества использования глубокого цикла Миллера на основе моделирования и испытаний двигателя Wartsila 20 с  $p_{me} = 27,3$  бар и ДСН с общей степенью

повышения давления 8,3. В результате оптимизации ДСН уровень достигнутого КПД превысил 72 % на полной нагрузке и 75 % — на частичной, что позволило снизить удельный расход топлива на 2–3 % и эмиссию  $NO_x$  на 50 %.

**СИМАС 2010. Конструкция и первое применение двухступенчатой системы наддува на среднеоборотном двигателе [12, 13]**

Фирма «Wartsila» приступила к разработке промышленного ДСН для СОД W20V32. Система наддува состоит из четырех ТК (по одному турбокомпрессору ВД и НД на каждый блок) с охладителями воздуха. Система наддува скомпонована на одном конце двигателя. При настройке двигателя на минимальную экономичность было достигнуто снижение удельного расхода топлива на 8,4 г/кВт·ч, при этом концентрация  $NO_x = 576$  ppm. При настройке на минимальные выбросы снижение удельного расхода топлива составило 4,7 г/кВт·ч, концентрация  $NO_x = 538$  ppm [13].

**СИМАС 2013. Разработка современного четырехтактного дизеля на фирме «Wartsila» [14]**

Приведены результаты исследований по снижению эмиссии  $NO_x$  на различных опытных двигателях с ДСН, начиная с 2006 г. (рис. 2.1 и 2.2). Испытания ДСН в комбинации с такими

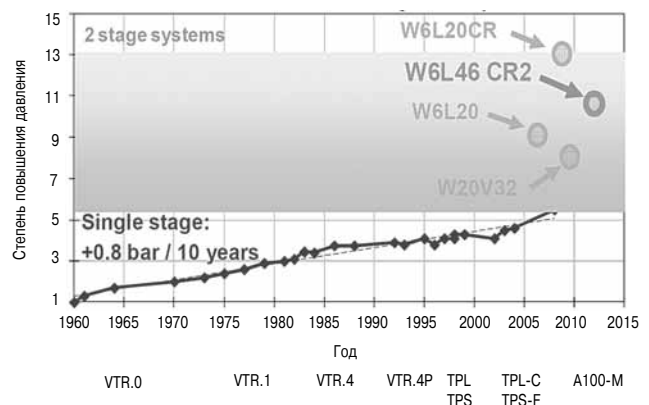


Рис. 2.1. Хронология развития двухступенчатых систем наддува на двигателях фирмы «Wartsila»

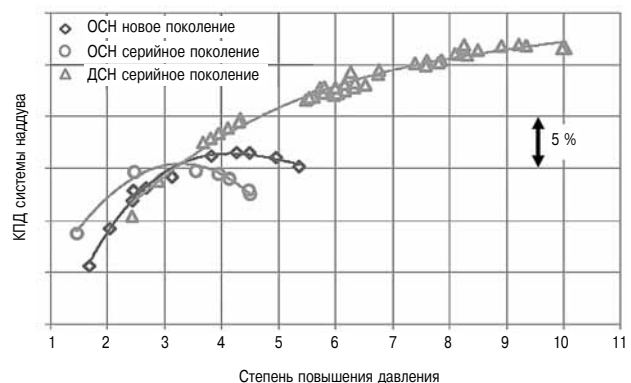


Рис. 2.2. КПД систем двух- и одноступенчатого наддува

технологиями, как EGR и SCR, выполнялись на опытном двигателе 6L20. Первая промышленная система ДСН на двигателе W20V32 была испытана в эксплуатации. Испытания подтвердили снижение  $\text{NO}_x$  и повышение топливной экономичности вследствие высокого КПД системы наддува.

Исследования на двигателе W6L46 совместно с системой ДСН (максимальный КПД больше 75 %) показали возможность увеличения мощности на 20 % при улучшении эффективности двигателя в диапазоне средних и высоких нагрузок на 6 %. Проектные рабочие параметры были достигнуты при выполнении всех ограничений по термической нагрузке и максимальному давлению сгорания.

При разработке системы ДСН особое внимание было уделено ее конструктивному исполнению, при котором:

- вся система наддува размещается на двигателе;
- обеспечиваются компактные размеры двигателя при сохранении удобства обслуживания и хорошей эксплуатационной надежностью;
- предусматриваются необходимые средства управления наддувом (воздух/отработавший газ/охлаждающая вода) в пределах располагаемого габарита.

Основываясь на результатах работы системы ДСН для двигателей W20V32 и W6L46, фирма «Wartsila» выполнила оптимальные компоновки для будущих моделей V-образных и рядных среднеоборотных дизелей и газовых двигателей среднего размера.

#### СИМАС 2016. Опытные двигатели с двухступенчатой системой наддува [15]

##### Дизели

Для снижения удельного расхода топлива и выброса  $\text{NO}_x$  был использован цикл Миллера на двигателях Wartsila еще в девяностые годы. Глубокий цикл Миллера обеспечивает дальнейшее улучшение параметров, но требует увеличения



Рис. 2.3. Двухступенчатая система наддува на двигателе W6L20

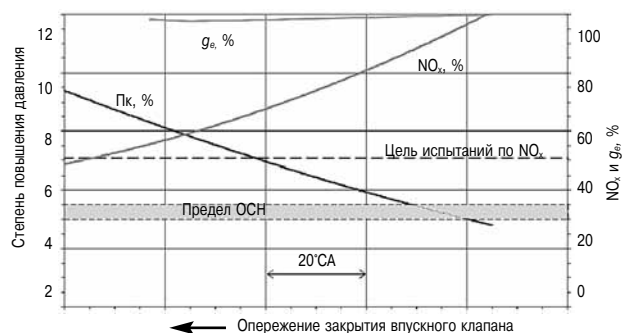


Рис. 2.4. Влияние цикла Миллера на  $\pi_k$  и эмиссию  $\text{NO}_x$

давления наддува до значений, при которых необходима система ДСН. Первые испытания были проведены на дизеле Wartsila 6L20, при этом ТК второй ступени был размещен на отдельной стойке (рис. 2.3).

Первые результаты испытаний показали, что выбросы  $\text{NO}_x$  снижены почти на 50 % от исходного уровня (рис. 2.4).

На основе положительного опыта первых испытаний был спроектирован и изготовлен полноразмерный 20-цилиндровый двигатель Wartsila 32 (Wartsila 20V32TS) с глубоким циклом Миллера и ДСН. Все элементы системы наддува были компактно установлены на одном конце двигателя. Этот двигатель имеет номинальную цилиндговую мощность 520 кВт при 750 об/мин. Концентрация  $\text{NO}_x$  для первоначальной версии двигателя была установлена на уровне 550 ppm, однако на построенном двигателе она увеличилась до 710 ppm. Снижение удельного расхода топлива при этом составило около 4 % [10].

Приведены обобщенные результаты выполненных стендовых испытаний дизеля:

- увеличение выходной мощности на 13–15 %,
- повышение КПД системы наддува на величину до 10 %,
- снижение удельного расхода топлива на 7–9 г/кВт·ч,
- снижение выброса  $\text{NO}_x$  до 50 %,
- тепловая нагрузка ниже максимальных пределов даже при высоких температурах окружающей среды и на больших высотах.

Выявлены проблемы и необходимые доработки:

- ухудшение рабочих параметров на долевых режимах и при принятии нагрузки требует введения переменных фаз газораспределения;
- необходимы специальные ТК, предназначенные для использования в составе систем ДСН;
- требуются исследования различных вариантов перепускных механизмов.

Турбокомпрессор высокого давления (ВД) требует снижения объемного расхода при низких

степенях повышения давления, то есть лучшей эффективности при  $\pi_k = 2,0-2,5$ . При этом с учетом переменного времени открытия впускного клапана, компрессор НД должен иметь широкую расходную характеристику, а ТК ВД быть работоспособным при высоком давлении на впуске. ТК НД может быть традиционной конструкции, но с повышенной пропускной способностью турбины.

На следующем этапе была разработана система ДСН для рядного двигателя Wartsila 6L46F с большим диаметром цилиндра, которая должна обеспечить динамику двигателя, аналогичную динамике с ОСН [12]. Испытания двигателя начались в 2012 г. Двигатель служил многоцелевой моделью для испытаний системы ДСН в сочетании с SCR и EGR и перепуском. В период испытаний с 2012 по 2015 г. наработка двигателя составила около 2000 часов. Была достигнута  $\pi_k$  около 10,0 и общем КПД системы ДСН 77 % при  $p_{me} = 31,4$  бар. Использование глубокого цикла Миллера позволило снизить удельный расход топлива на 10 г/кВт·ч при нагрузке  $p_{me} = 25,9$  бар. Снижение выбросов  $NO_x$  составляет около 30 %, а тепловая нагрузка деталей камеры сгорания была значительно ниже, чем при использовании ОСН.

#### Газовые и двухтопливные двигатели

Разработка системы ДСН для газового двигателя началась на одноцилиндровом отсеке в 2011 г. для изучения возможностей этой системы наддува.

Цикл Миллера приводит к снижению температуры воздушного заряда, что положительно воздействует как на возможный пропуск вспышек, так и на снижение детонации. Расширение диапазона по коэффициенту избытка воздуха позволяет газовому двигателю работать с его оптимальным значением, равным 2, при более высокой форсировке по  $p_{me}$ . (рис. 2.5).

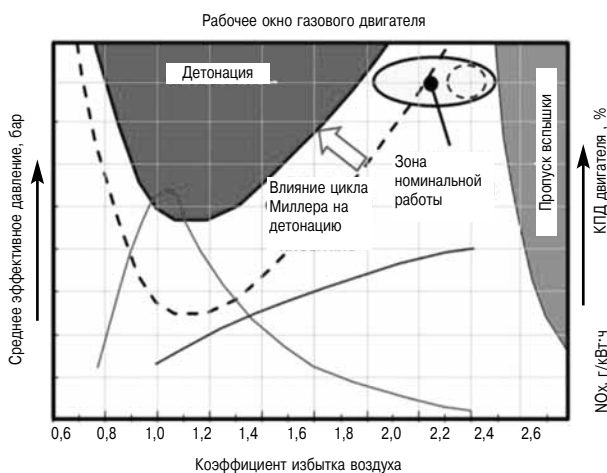


Рис. 2.5. Влияние экстремального цикла Миллера на зоны работы газового двигателя

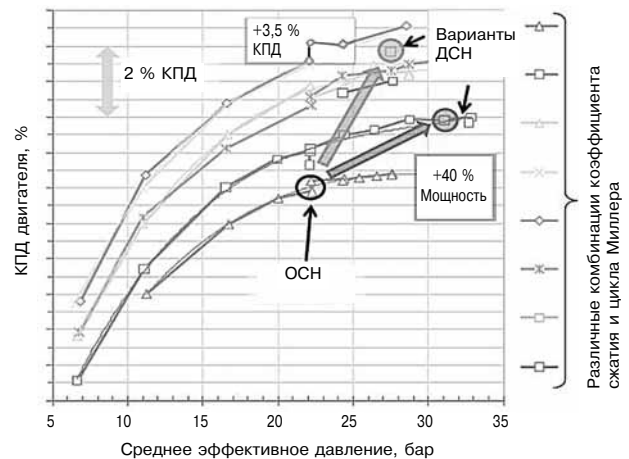


Рис. 2.6. Результаты оптимизации рабочего процесса газового двигателя на одноцилиндровом отсеке с ДСН

Расширение диапазона режимов работы может быть эффективно использовано для улучшения характеристик газового двигателя по следующим параметрам:

- повышение форсировки за счет увеличения  $p_{me}$ ;
- повышение КПД двигателя за счет увеличения степени сжатия;
- возможность работы на полной мощности при использовании топлива с низким метановым числом;
- возможность работы на полной мощности при неблагоприятных внешних условиях (повышенная температура окружающего воздуха) или большая высота.

Развитие ДСН газового двигателя при увеличении степени форсировки по  $p_{me}$  связано с ростом степени повышения давления (рис. 2.6 и 2.7). При этом более высокие значения  $p_{me}$  и КПД требуют согласования с максимальным давлением сгорания. (рис. 2.8).

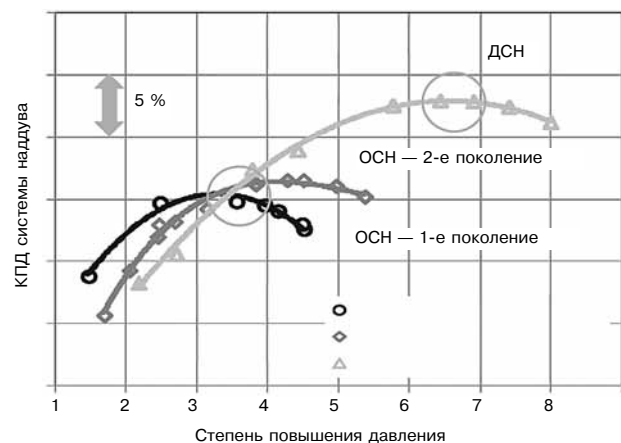


Рис. 2.7. Параметры экстремального цикла Миллера для газового двигателя

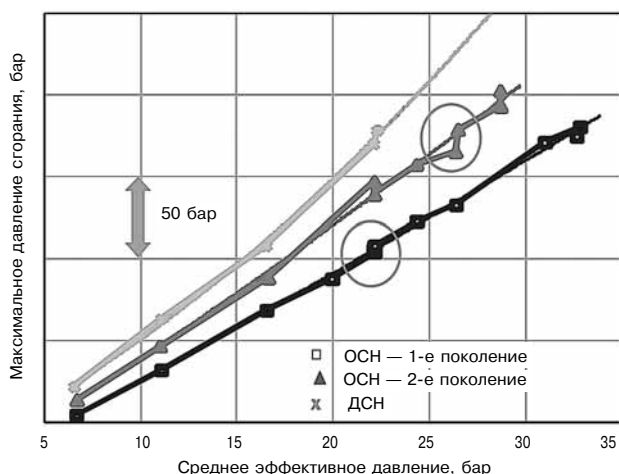


Рис. 2.8. Параметры экстремального цикла Миллера

Результаты исследований на одноцилиндровом отсеке позволили перейти к испытаниям на полноразмерных газовых и двухтопливных двигателях Wartsila 34SG и Wartsila 20DF. Благодаря повышенной стойкости к детонации появилась возможность улучшить способности к принятию нагрузки.

В дальнейшем был разработан опытный двухступенчатый двигатель 20V32SG с ДСН, испытания которого начались в 2013 г. При его создании ставилась задача максимально увеличить мощность и КПД по сравнению с дизелем за счет более стабильного сгорания. При этом задача снижения выбросов  $\text{NO}_x$  не ставилась, так как настройка двигателей, как правило, соответствует требованиям TA-Luft.

Результаты испытаний показали:

- Возможность увеличения мощности на величину до 35 %. Предел детонации больше не является ограничивающим фактором для увеличения мощности, однако максимальное давление сгорания ограничено. Достигнуто значение  $p_{me} = 32,5$  бар при степени повышения давления, равной 9.

- Возможность повышения КПД системы наддува на величину до 10 % и КПД двигателя на 4–5 %.

Были выявлены следующие проблемы:

- Для газовых двигателей, как и для двигателей двойного топлива с ДСН, необходимы специальные ТК.

- Необходимость ограничения максимального давления сгорания при высоких значениях  $p_{me}$  предопределяет модернизацию существующей или разработку совершенно новой конструкции двигателя.

- Требуется разработка и исследования работы в динамике различных механизмов для управления системой ДСН.

По результатам испытаний опытного двигателя первые пять двигателей Wartsila 20V32TS были запущены в производство в 2015 году, успешно прошли приемочные испытания и переданы в коммерческую эксплуатацию. ДСН была поставлена фирмой ABB Turbo Systems.

(Продолжение в следующем номере)

#### Литература

1. 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.
2. Ципленкин Г.Е., Иовлев В.И., Сухарев А.Н. Двухступенчатый наддув — атрибут двигателя будущего. Двигателестроение. — 2011. — № 2. — С. 25–32.
3. Ципленкин Г.Е., Иовлев В.И. Очередной шаг в развитии двухступенчатых систем наддува (обзор докладов конгресса CIMAC). Двигателестроение. — 2013. — № 4. — С. 12–24.
4. Codan E., Mathey C. Emissions — A new Challenge for Turbocharging. Paper № 245, CIMAC 2007, Vienna
5. Codan E., Bernasconi S., Born H. IMO III Emission Regulation: Impact on the Turbocharging System. Paper № 139, CIMAC 2010, Bergen.
6. Codan E., Mathey C., Rettig A. 2-Stage Turbocharging — Flexibility for Engine Optimisation. Paper № 293, CIMAC 2010, Bergen.
7. 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.
8. 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.
9. Ryser R., Mathey C., Mitter A. Power2 — Is 2-Stage Turbocharging Interesting for 2-Stroke Engines, № 281, CIMAC 2016, Helsenky.
10. European Patent, No. EP 0 965 739 A2, «Diesel Engine», Wartsila NSD Switzerland Ltd.
11. Wik C., Hallback B. Utilisation of 2-stage turbo charging as an emission reduction mean on a Wartsila 4-stroke medium-speed diesel engine. № 101, CIMAC 2007, Vienna.
12. Raikio T., Hallback B., Hjort A. Design and first application of a 2-stage turbocharging system for a medium-speed diesel engine. № 82, CIMAC 2010, Bergen.
13. Heim K., Troberg M., Ollus R., Vaarasto M. Latest developments in Wartsila's medium-speed engine portfolio. Paper № 206, CIMAC 2010, Bergen
14. Ollus R.B., Raikio T., Suominen A., Akerman J., Tonon P., Delneri D., Bochicchio A. Update on Wartsila 4-stroke Diesel Product Development. № 282, CIMAC 2013, Shanghai.
15. Vaarasto M., Hallback B., Delneri D., Raikio T. Experience of 2-stage turbocharged engines. № 191, CIMAC 2016, Helsenky.