

ОБЗОР ДОКЛАДОВ ПО ГАЗОТУРБИННОМУ НАДДУВУ НА КОНГРЕССЕ СИМАС 2007

Г.Е. Ципленкин, к.т.н., Р.С. Дейч, к.т.н., В.И. Иовлев, к.т.н., А.А. Коженков, инженер
ООО «Турбоком»

Представлены рефераты докладов СИМАС 2007:

- оценка предоставляемых возможностей двухступенчатой системой наддува с циклом Миллера для снижения выбросов окислов азота и улучшения топливной экономичности;
- снижение дымности при набросе нагрузки за счет использования регулируемой импульсной системы наддува и подачи воздуха на колесо компрессора;
- обеспечение стандартных межремонтных сроков службы двигателя при работе на тяжелом топливе за счет введения более продолжительного впрыска воды для очистки проточной части турбины;
- использование при проектировании упрощенных методов оценки вибрационной прочности колеса центробежного компрессора для обеспечения его надежности.

В связи с растущим во всем мире пониманием важности сохранения природной среды основной приоритет в докладах прошедшего конгресса СИМАС 2007 был отдан вопросам экологии. Повышение давления наддува и КПД силовых установок и их агрегатов играют важную роль в решении вопросов снижения вредных выбросов. Для ознакомления с решениями этих проблем представлены развернутые рефераты докладов по газотурбинному наддуву и турбокомпрессорам.

1. Новый вызов турбокомпрессорам в связи с требованиями к выбросам [1]

Главное внимание при разработке двигателей сегодня уделяется снижению выбросов в соответствии с регламентирующими документами.

Снижение выбросов связано с возможностями высокого наддува. Одноступенчатый наддув даже с современной технологией проектирования и изготовления исчерпал свои возможности и требуется многоступенчатый наддув (рис. 1).

В докладе проанализированы идеальные циклы двигателя, в том числе и цикл Миллера. Цикл Миллера обеспечивает выигрыш в термическом КПД двигателя, обусловленный снижением начальной температуры цикла и большей положительной площадью цикла расширения. Сопоставление значений КПД в зависимости от максимального давления сгорания для степени сжатия 16 и среднего эффективного давления

30 бар показало, что для обеспечения КПД 60 % в обычном двигателе требуется максимальное давление сгорания 270 бар, а в цикле Миллера оно может быть снижено до 190 бар. Таким образом, цикл Миллера позволяет достичь хорошего КПД при относительно низких давлениях сгорания или увеличить мощность без повышения максимального давления сгорания при том же уровне КПД. Одновременно уменьшаются выбросы NO_x в результате более низких температур сгорания. Изменение среднего эффективного давления в зависимости от степени повышения давления в двигателе с циклом Миллера и без него показано на рис. 2.

Приведен перечень потерь в реальном цикле двигателя с эффективным КПД 50 %: КПД идеального цикла — 68,6 %; потери трения — 3,6 %; потери в турбокомпрессоре — 1 %; потери с выпускными газами — 1,2 %; потери из-за свойств газа — 8,4 %; тепловые потери — 4,1 %; потери из-за реального сгорания — 0,3 %.

Изменение разности давлений на входе и выходе из цилиндра имеет большое значение для газообмена и КПД двигателя. При КПД турбокомпрессора 65 % и температуре на входе в турбину 550 °С максимально достижимая степень повышения давления не более 6 (рис. 3). Более высокий уровень КПД (75 %) обеспечивает более высокие значения, достигающие 10.

КПД турбокомпрессора оказывает сильное влияние на степень расширения и требуемую пропускную способность турбины. Так, при степени повышения давления $\pi_k=4,5$ и увеличении

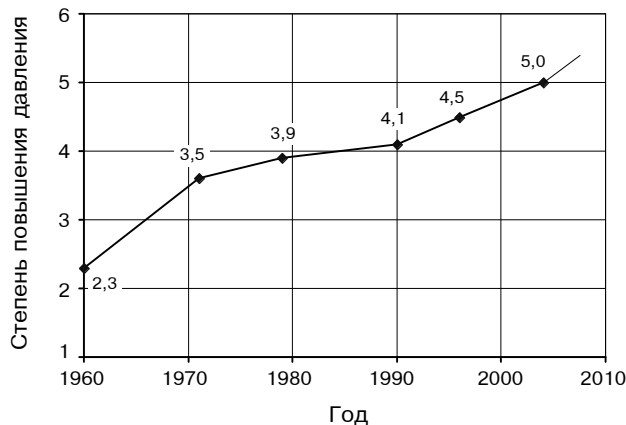


Рис. 1. Степень повышения давления в одноступенчатом турбокомпрессоре с алюминиевым колесом

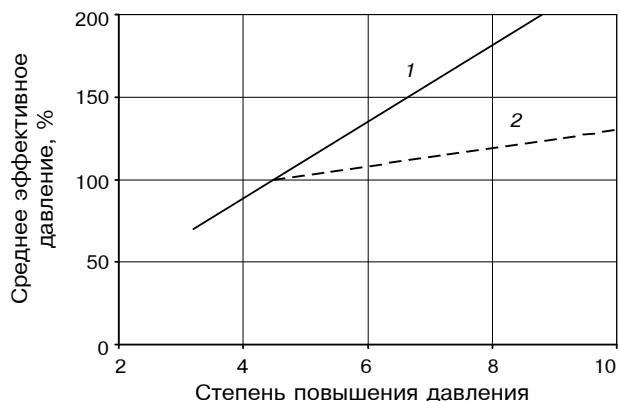


Рис. 2. Изменение среднего эффективного давления в зависимости от степени повышения давления в двигателе с циклом Миллера (2) и без него (1)

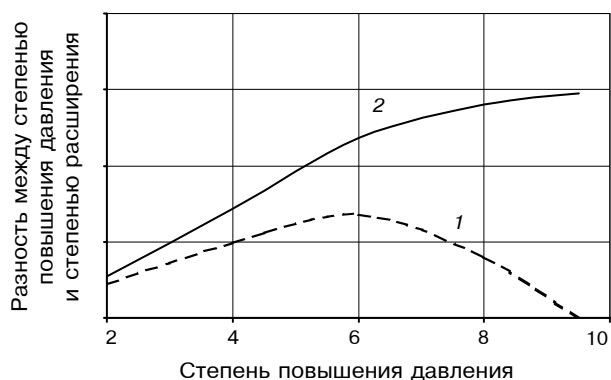


Рис. 3. Влияние степени повышения давления на разницу давлений на входе в цилиндр и на выходе из него: 1 и 2 — КПД турбокомпрессора 65 и 75%

КПД турбокомпрессора с 55 до 65% требуется увеличение пропускной способности турбины на 33%, а при $\pi_k = 9,0$ изменение КПД системы наддува от 66 до 76 % требует увеличения пропускной способности на 48 %.

Это обстоятельство является причиной перехода к двухступенчатой системе наддува (ДСН), при котором можно получить очень высокий КПД, который обеспечивается промежуточным охлаждением воздуха между ступенями. Процесс сжатия приближается к изотермическому с уменьшением энергии на сжатие. Выигрыш в КПД зависит от снижения температуры в промежуточном холодильнике и общей степени повышения давления (рис. 4). КПД ДСН имеет более высокое значение и по другим причинам:

- более полное использование энергии расширения в турбине;
- более высокий КПД компрессора и турбины (более низкие скорости потока), в том числе и за счет снижения механических потерь.

Представление о влиянии степени повышения давления на пропускную способность, в том числе и при цикле Миллера, дает рис. 5. Кривые имеют максимум, поэтому при высоких давлениях наддува за максимумом на частичных нагрузках

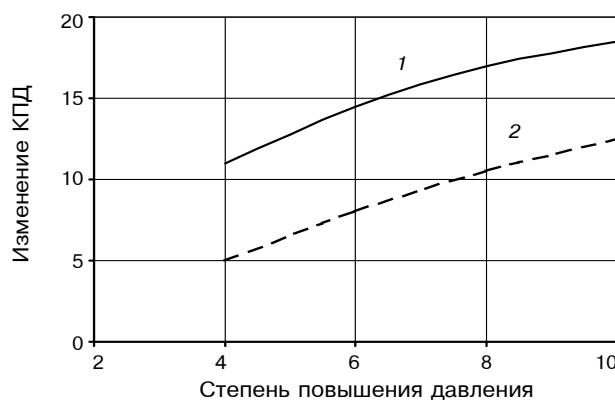


Рис. 4. Повышение КПД при охлаждении до 25 (1) и 60 °C (2) после промежуточного холодильника

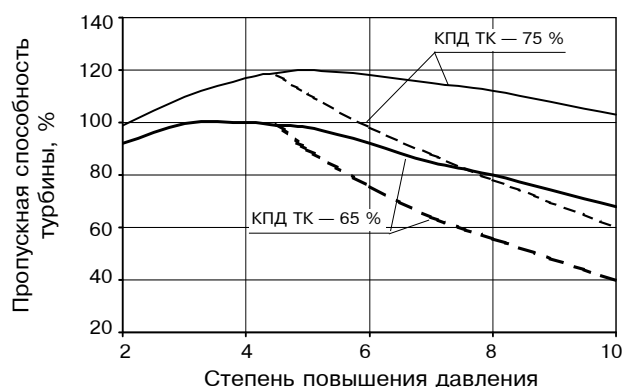


Рис. 5. Влияние степени повышения давления на пропускную способность турбины: ——— — цикл Миллера

давление наддува будет поддерживаться лучше (особенно при цикле Миллера), чем на двигателях с меньшей форсировкой.

ДСН, несмотря на большой первоначальный интерес, получила очень ограниченное применение. Степени повышения давления при использовании ДСН находились в диапазоне от 4 до 6, т. е. в пределах близких к достигнутым при одноступенчатом наддуве, и сопровождалась увеличением объема и массы системы наддува.

Сопоставление одно- и двухступенчатых систем наддува фирма АВВ предлагает осуществлять на основе качественного параметра (значение взвешенной функции) в зависимости от степени повышения давления. Этот параметр оценивается с использованием следующих критериев: назначение установки, характеристика турбокомпрессора (КПД, пропускная способность, ширина характеристики, гибкость согласования и т. д.), надежность и долговечность, габаритные размеры, удобство обслуживания и т. д.

По результатам такой оценки фирмой АВВ сделаны следующие заключения:

- одноступенчатый турбокомпрессор является оптимальным решением для давлений наддува

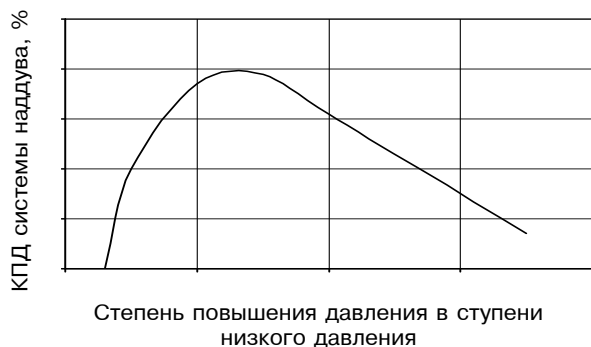


Рис. 6. Оптимальное распределение давления между ступенями

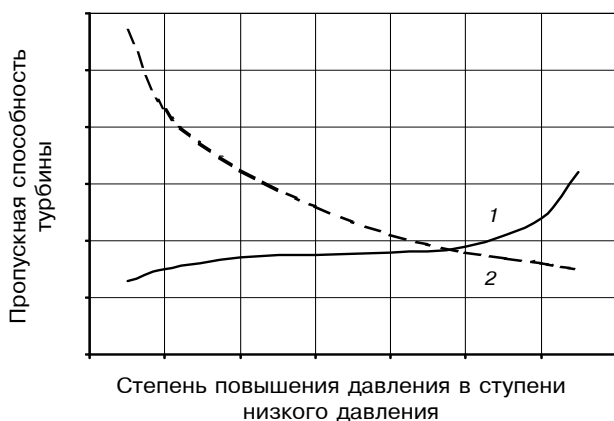


Рис. 7. Требуемые пропускные способности турбин:
1 и 2 — ступени высокого и низкого давления

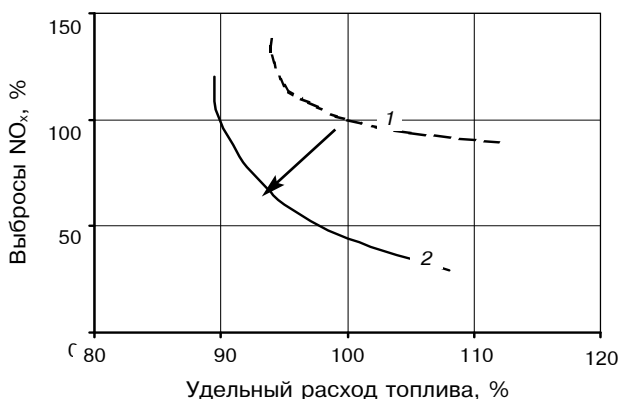


Рис. 8. Сравнительные кривые для различных циклов и систем наддува

1 — двигатель с современным средним эффективным давлением с обычным циклом и одноступенчатым наддувом; 2 — оптимизированный цикл Миллера и двухступенчатая система наддува

ва 5–6 бар как по термодинамическим, так и по эксплуатационным требованиям;

➤ ДСН с двумя свободными турбокомпрессорами целесообразно применять для степеней повышения давления более 6.

При проектировании ДСН для обеспечения ее максимального КПД возникает вопрос рас-

пределения степени повышения давления между ступенями. Это распределение зависит от КПД турбокомпрессоров и температуры на входе в каждую ступень. Кривая на рис. 6 рассчитана при постоянном значении полной степени повышения давления в двух ступенях в предположении, что температура после холодильника равна 60 °С, а КПД турбокомпрессоров одинаков. Максимальный КПД системы достигается при степени повышения давления от 3 до 4 в ступени низкого давления. На рис. 7 представлены изменение пропускной способности турбин ступеней высокого и низкого давления. Следует отметить, что пропускная способность турбины высокого давления почти не изменяется при широком диапазоне степеней повышения давления ступени низкого давления.

Для оценки возможностей ДСН фирма АВВ выполнила моделирование различных рабочих циклов. Используя высокие давления наддува в цикле Миллера и возможности различного перекрытия клапанов, были получены результаты, показанные на рис. 8. Они показали возможность снижения в цикле Миллера с системой двухступенчатого наддува удельного расхода топлива примерно на 10 % и выбросов окислов азота почти на 40 %. Таким образом, показана реальная возможность дальнейшей форсировки двигателя со снижением удельного расхода топлива и выбросов. Результаты моделирования подтверждены испытаниями на двигателях.

2. Использование двухступенчатого наддува на 4-тактных среднеоборотных дизелях фирмы Вяртсиля как средства уменьшения выбросов [2]

Снижение температуры процесса сгорания в цикле Миллера позволяет существенно снизить выделение NO_x . Но для этого цикла требуется высокое давление наддува, которое приводит к ухудшению характеристик двигателя на частичных нагрузках. Оценка достигаемых преимуществ и возможности устранения возникающих трудностей при использовании цикла Миллера с ДСН была выполнена на основе моделирования двигателя Вяртсиля 20 со средним эффективным давлением 27,3 бар. Расчеты были выполнены для трех вариантов:

- постоянные угол закрытия впускного клапана (УЗВК) 60° до НМТ и угол перекрытия клапанов (УПК) 84°;
- регулируемый УЗВК от 60 до 0° в зависимости от нагрузки и постоянный УПК 84°;
- регулируемые УЗВК от 60 до 0° и УПК от 84 до 54° в зависимости от нагрузки.

Результаты расчетов представлены на рис. 9–11. Развитый цикл Миллера без регулирования приводит к неприемлемо низким коэффициентам избытка воздуха α на низких нагрузках и к

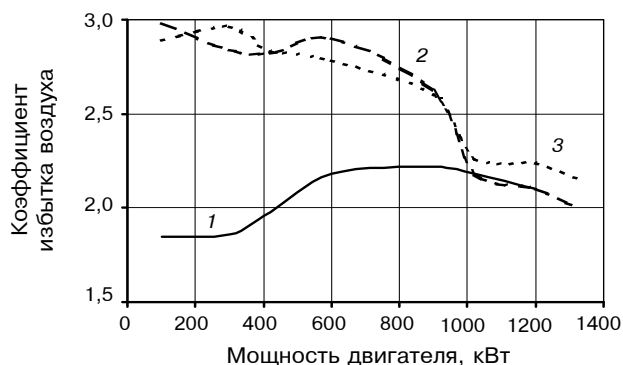


Рис. 9. Коэффициент избытка воздуха в зависимости от нагрузки двигателя при различном моделировании цикла Миллера с двухступенчатой системой наддува:

1 — постоянный угол закрытия впускного клапана; 2 — регулируемое закрытие впускного клапана; 3 — регулируемые закрытие впускного клапана и перекрытие клапанов

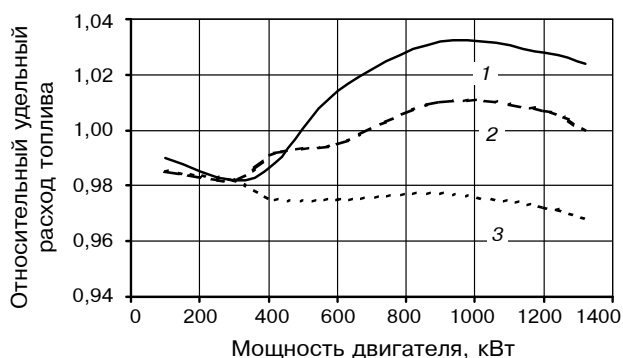


Рис. 10. Изменение удельного расхода топлива в зависимости от нагрузки двигателя при различном моделировании цикла Миллера с ДСН:

1 — постоянный угол закрытия впускного клапана; 2 — регулируемое закрытие впускного клапана; 3 — регулируемые закрытие впускного клапана и перекрытие клапанов

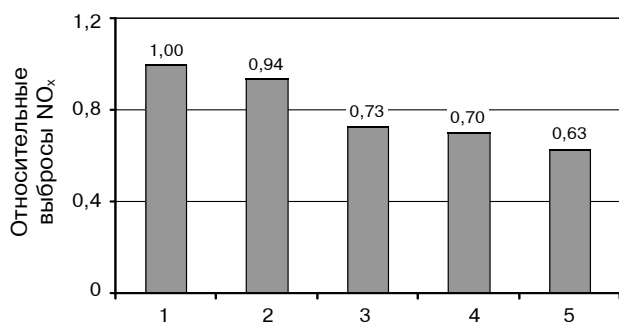


Рис. 11. Сопоставление выбросов NO_x при моделировании различных рабочих циклов:

1 — одноступенчатая система наддува — эксперимент; 2 — одноступенчатая система наддува; 3 — цикл Миллера с постоянным закрытием впускного клапана; 4 — цикл Миллера с регулируемым закрытием впускного клапана; 5 — цикл Миллера с регулируемым закрытием впускного клапана и перекрытием клапанов

высоким температурам выпускного газа и деталей (см. рис. 9). Введение регулируемого УЗВК позволяет увеличить α на частичных нагрузках с 1,80 до 2,85. При этом температура воздуха в ресивере поддерживалась постоянной.

Изменение удельного расхода топлива b_e при различных вариантах моделирования цикла Миллера с ДСН в сравнении с одноступенчатым наддувом дано на рис. 10. Снижение b_e на 3 % при полной нагрузке связано с уменьшением УПК на 30°. Более ранний УЗВК не снижает b_e . Причиной высокого b_e в варианте с циклом Миллера является перепускной клапан для поддержания максимального давления сгорания в цилиндре в допустимых пределах при высокой нагрузке. Максимальное давление сгорания во всех случаях поддерживалось постоянным.

Рассчитанное образование в NO_x при полной нагрузке в сравнении с одноступенчатой системой наддува показывает возможность снижения их выброса на 37 % (рис. 11).

Результаты моделирования были дополнены испытаниями на двигателе Вяртсиля 20 с одноступенчатой системой наддува при давлении до 6,2 бар, что позволило использовать цикл Миллера с УЗВК 47°. Отмечено, что с увеличением УЗВК до этого значения образование окислов азота уменьшается линейно с развитием цикла Миллера. При предельном значении УЗВК выброс NO_x был снижен на 35 %.

Главные проблемы, выявленные при испытаниях, — это высокий уровень дымности при низких нагрузках, сопровождаемый образованием сажи, и затруднения с пуском. Средством для решения этих проблем является увеличение α при низкой нагрузке и КПД двигателя, а также подогрев воздуха на всасывании перед пуском. Для этого при последних испытаниях был установлен вспомогательный вентилятор на входе в компрессор, который позволил уменьшить дымность до 65–70 % при низкой нагрузке.

Экспериментальные испытания с развитым циклом Миллера (УЗВК 81°) и ДСН с общей степенью повышения давления 8,3 были выполнены на двигателе Вяртсиля 20. Сопоставление выполнялось с параметрами при одноступенчатом наддуве без цикла Миллера. Выбросы NO_x были сильно снижены, в то время как термическая нагрузка и КПД двигателя остались неизменными при высокой нагрузке (рис. 12 и 13). Уровень выбросов NO_x был снижен на 40 % при полной нагрузке, и на 50 % — при нагрузке 75 %. Причиной сильного увеличения выбросов NO_x при низкой нагрузке является низкая температура конца сжатия с последующим очень быстрым выделением тепла. Быстрое сгорание при низкой нагрузке также вызывает высокую термическую нагрузку (см. рис. 13). Положительным результатом быстрого заранее подготовленного сгорания при низкой нагрузке было уменьшение дымления.

При выполнении исследований ДСН была оптимизирована. Уровень достигнутого КПД

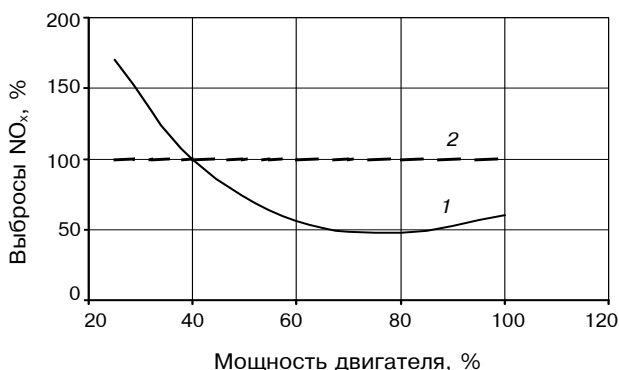


Рис. 12. Снижение выбросов окислов азота при экстремальном цикле Миллера и двухступенчатой системе наддува:

1 — цикл Миллера с двухступенчатой системой наддува; 2 — одноступенчатая система наддува без цикла Миллера

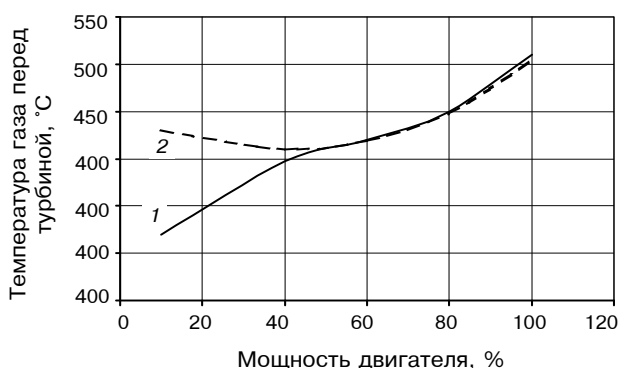


Рис. 13. Температура газа перед турбиной:

1 — одноступенчатая система наддува без цикла Миллера; 2 — температура газа перед турбиной ступени высокого давления при цикле Миллера с ДСН

при этих испытаниях лежит в пределах 72 % (полная нагрузка) — 75 % (частичная нагрузка), рис. 2.6.

Показана возможность улучшения характеристики двигателя на холостом ходу и малых нагрузках при системе регулируемого УЗВК, которая позволяет установить более позднее УЗВК при пуске и работе на частичных нагрузках. Влияние УЗВК на параметры двигателя показано на рис. 2.7 и 2.8. Сопоставление выполнено при умеренном цикле Миллера (угол ЗВК 33° до НМТ), но выигрыш ощутим: α увеличено на 15 %, а температура перед турбиной снижена на 7 %. При более развитом цикле Миллера выигрыш будет больше.

Важным преимуществом системы с регулируемым УЗВК является то, что компрессор турбокомпрессора может быть лучше оптимизирован, и она заменяет систему перепуска воздуха, часто используемую для улучшения характеристики на частичной нагрузке.

Следует отметить, что использование целиком гибкой регулируемой системы УЗВК экономически выгодно только для двигателей с боль-

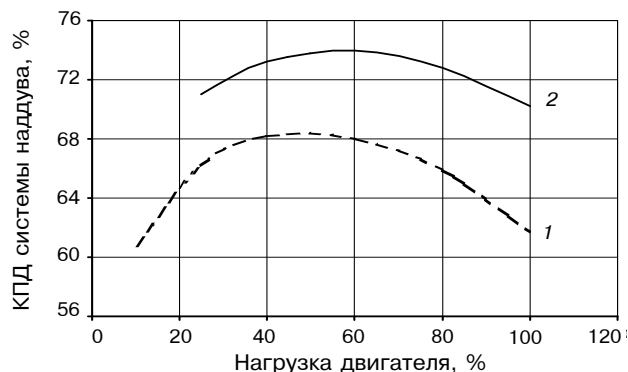


Рис. 14. КПД системы наддува:

1 и 2 — одноступенчатая и двухступенчатая системы наддува

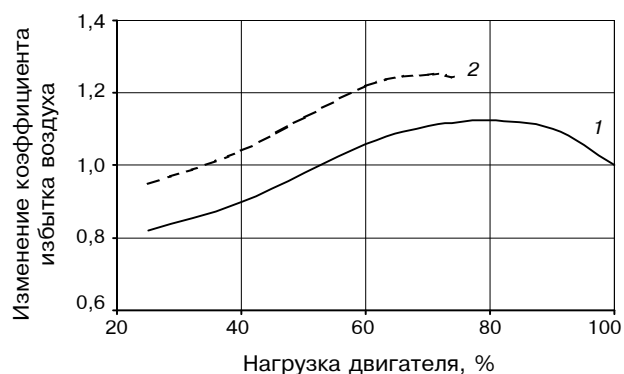


Рис. 15. Влияние угла закрытия впускного клапана на коэффициент избытка воздуха:

1 и 2 — угол закрытия 33° до НМТ и 1° до НМТ

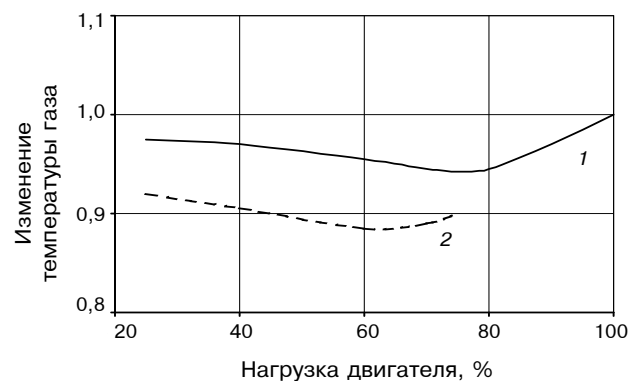


Рис. 16. Влияние угла закрытия впускного клапана на температуру выпускного газа:

1 и 2 — угол закрытия 33° до НМТ и 1° до НМТ

шим размером цилиндра. Для двигателей с малым размером цилиндра пригодна простая регулируемая система УЗВК (два положения) и другие решения, такие как внешняя воздухоудка и система подогрева охлаждающей воды.

Таким образом, сочетание цикла Миллера с ДСН и укороченной продувкой делает возможным снижение удельного расхода топлива на 2–3 % с уменьшением выброса NO_x на 50 %.

(Продолжение в следующем номере)