

УЛУЧШЕНИЕ ТОПЛИВНОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ НАДДУВА

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

Выполнен обзор и анализ развития систем регистрового наддува фирм MTU, «Mitsubishi», MAN, «Honeywell». Показаны возможности оптимизации параметров наддува за счет отключения одного или нескольких ТК при работе двигателей на частичных нагрузках с целью улучшения топливной экономичности.

(Продолжение. Начало в № 2 (256) 2014)

1.3. Регистровая система наддува

Регистровая система наддува относится к эффективным средствам обеспечения минимального удельного расхода топлива во всем диапазоне режимов двигателя, в том числе и на малых нагрузках. Система управления двигателем в зависимости от режима работы подключает или отключает турбокомпрессоры (ТК) заслонками со стороны отработавших газов и наддувочного воздуха.

Система регистрового наддува с турбокомпрессорами собственного производства типа MTU ZR используется фирмой MTU на двигателях серии 2000, 4000 и 8000 [4–7], которые применяются в строительстве, промышленности, на железнодорожном транспорте, на торгово-коммерческих судах и кораблях военно-морского флота.

Судовой дизель 20V8000M71 мощностью 9100 кВт с номинальным средним эффективным давлением 27,3 бар и давлением наддува 4,1 бар оборудован регистровой системой наддува с четырьмя турбокомпрессорами [4, 9]. Два турбокомпрессора работают постоянно, а два других ТК могут быть задействованы при необходимости. В результате применения такой гибкой системы наддува двигатели серии 8000 хорошо обеспечиваются воздухом на всех режимах в зонах максимального КПД при работе с двумя, тремя и четырьмя турбокомпрессорами (рис. 27)

Система регистрового наддува на двигателе серии 4000 отличается по компоновке от системы двигателя серии 8000. В зависимости от частоты вращения и крутящего момента двигателя характеристика компрессора разделена на четыре зоны, соответствующие работе с одним, двумя, тремя и четырьмя турбокомпрессорами (рис. 28) [6, 9].

Основная часть расходных характеристик двигателя находится в зоне оптимального КПД компрессора (рис. 29). Система поддержания постоянного давления газов перед турбиной обеспечивает оптимальный КПД турбины. При работе с четырьмя турбокомпрессорами клапан перепуска воздуха увеличивает КПД турбокомпрессора. Если частота вращения двигателя падает ниже заданного предела, то открывается байпас от входа в холодильник к выпускному коллектору. Некоторое количество воздуха из компрессора поступает прямо на турбину, и рабочие точки компрессора перемещаются в зону

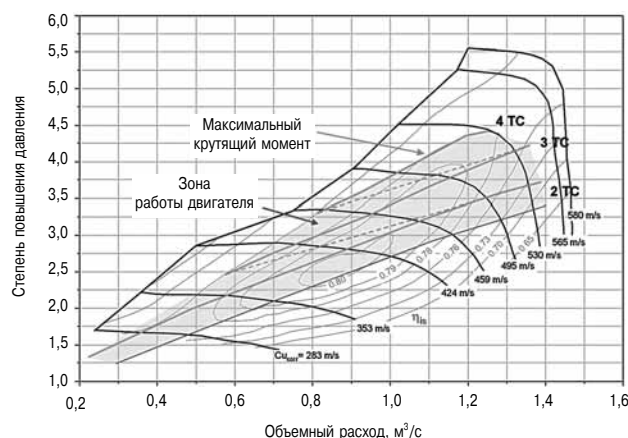


Рис. 27. Характеристика системы наддува с зонами работы двигателя MTU 8000 при максимальном КПД компрессора

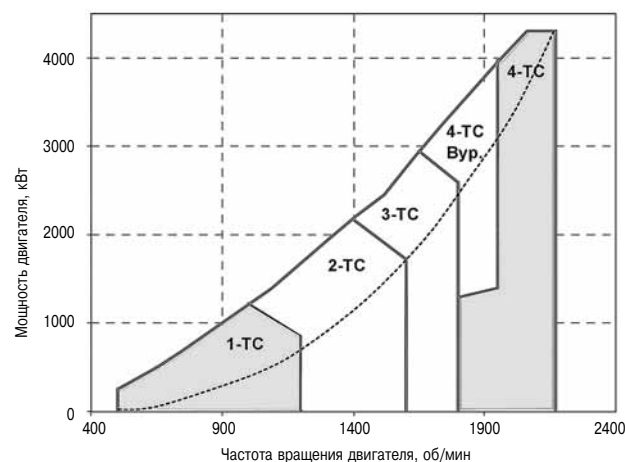


Рис. 28. Характеристика двигателя MTU 4000 при работе с различным числом турбокомпрессоров

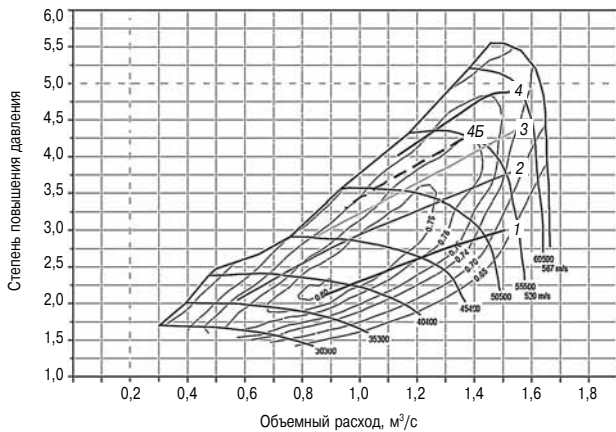


Рис. 29. Характеристика компрессора в системе регистрового наддува двигателя серии 4000

1 — работает один ТК; 2 — работают два ТК; 3 — работают три ТК; 4 — работают четыре ТК; 4Б — работают четыре ТК с открытым байпасом

более высокого КПД. В соответствующей зоне характеристики двигателя это приводит к уменьшению расхода топлива, снижению термической нагрузки в деталях цилиндро-поршневой группы двигателя и уменьшению выбросов двигателя.

В двигателях серии 2000 также используется регистровая система наддува с турбокомпрессором ZR125 7. Для 8- и 10-цилиндровых двигателей наддув осуществляется двумя турбокомпрессорами, для 12- и 16-цилиндровых двигателей — тремя ТК.

В одной из модификаций судовых двигателей MTU 4000 IRONMEN, предназначенных для буксиров [8], с увеличенным объемом цилиндра и пониженной форсировкой до 17,5 бар применяется регистровая система наддува с двумя турбокомпрессорами и перепуском воздуха на вход в турбину (рис. 30–31).

Двигатель на режимах малых и средних нагрузок работает только с одним турбокомпрессором, а затем, при повышении нагрузки до номинальной, с двумя ТК.

Следует отметить, что все турбокомпрессоры ZR фирмы MTU сконструированы как агрегаты, встроенные в выпускную систему двигателя с

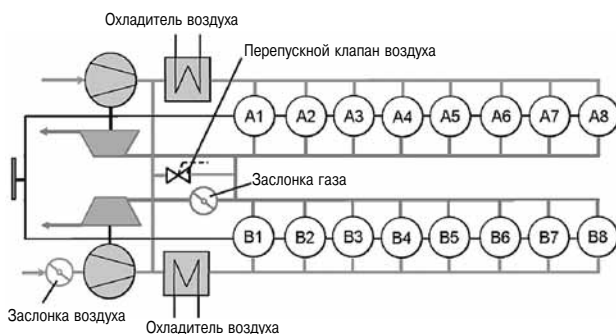


Рис. 30. Схема системы наддува двигателя 16V4000 IRONMEN для буксира

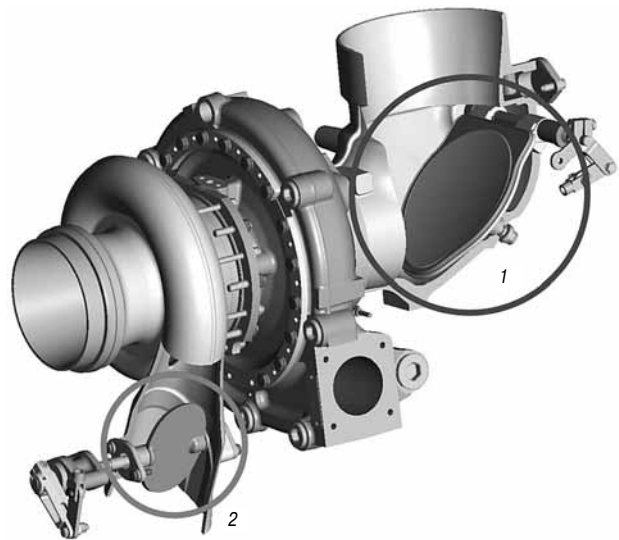


Рис. 31. Турбокомпрессор с заслонками воздуха на входе в компрессор (1) и входе в турбину (2) для регистрового наддува

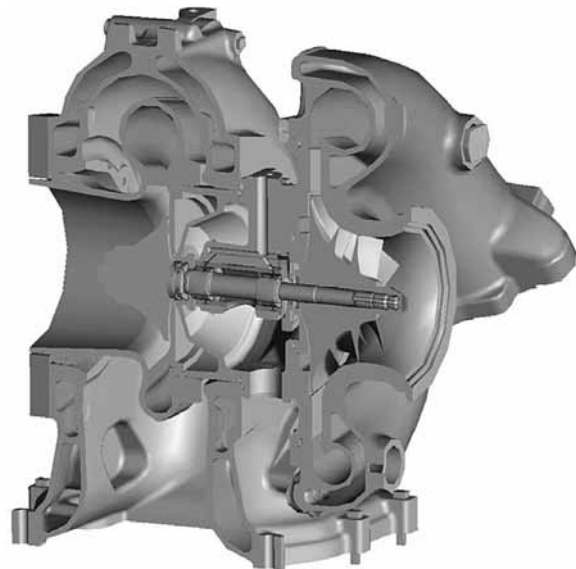


Рис. 32. Турбокомпрессор типа ZR фирмы MTU с охлаждаемыми корпусами

охлаждаемым корпусом (рис. 32) как турбины, так и компрессора. Это обеспечивает выполнение рекомендаций Международной Морской организации по безопасности жизни на море — температура поверхностей оборудования двигателя не должна превышать 70 °С, чтобы избежать возгорания топлива и масла при их утечке из двигателя.

Как вариант регистрового наддува фирма MAN предлагает схему отключения одного из нескольких турбокомпрессоров (рис. 33) [2] заглушками на выходе из компрессора и входе в турбину.

Конструкция заглушек представляет собой поворотные затворы, приводимые в действие пневмоцилиндрами (рис. 34).

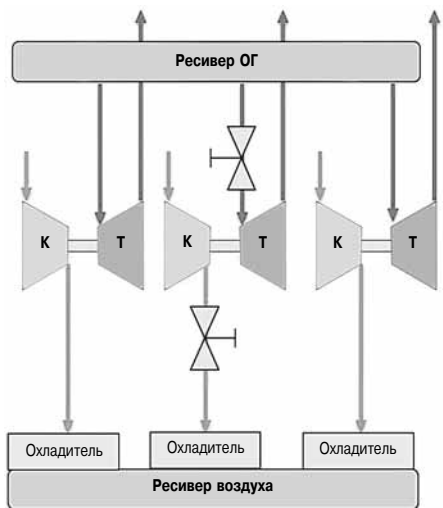


Рис. 33. Схема отключения турбокомпрессора

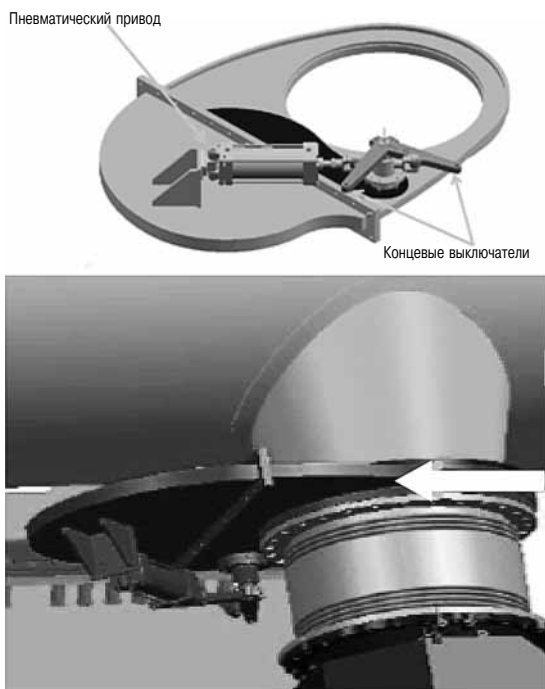


Рис. 34. Конструкция поворотного затвора и его установка

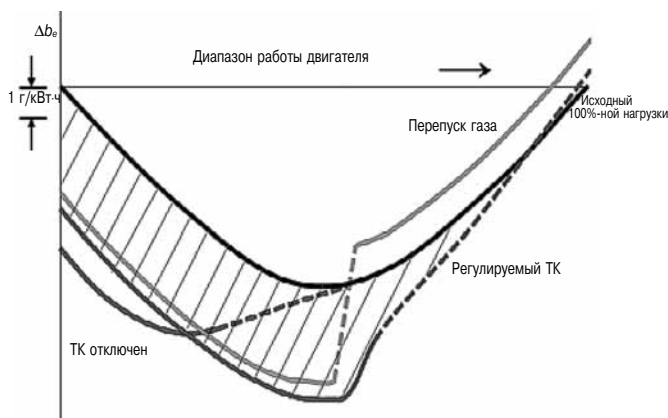


Рис. 35. Снижение расхода топлива на низких нагрузках при различных методах оптимизации

Поворотные затворы закрываются при работе двигателя на малых нагрузках для увеличения степени повышения давления, а в открытом положении обеспечивают выход на номинальную мощность. Мощность двигателя, при которой происходит отключение ТК, составляет 35 % от номинальной при отключении одного ТК из двух; 65 % — при отключении одного ТК из трех и 70 % — при отключении одного ТК из четырех. Варианты оптимизации расхода топлива при отключении одного из трех турбокомпрессоров представлены на рис. 35.

При длительной работе двигателя с нагрузкой меньше 50 % фирма «Mitsubishi» рекомендует отключать один из двух турбокомпрессоров за счет установки на двигателе соответствующей системы управления и топливной системы адаптированной для работы на низкой нагрузке [17]. Испытания двигателя 8UEC60LSII с двумя турбокомпрессорами показали возможность повышения давления продувки, снижения температуры ОГ и удельного расхода топлива при отключении одного из двух ТК (рис. 36). Если принять, что на нулевой линии расход топлива составляет около 210 г/кВт·ч, то снижение расхода топлива составляет примерно 2,5 %.

Регистровый наддув предусматривает наличие на двигателе нескольких турбокомпрессоров, что характерно для двигателей с большим числом цилиндров. Например, фирма MTU рассматривала варианты системы регистрового наддува с четырьмя турбокомпрессорами и в одном из докладов анализировала работу двух турбокомпрессоров [8].

На конгрессе CIMAC 2013 было представлено три доклада из Китая, где рассматривается работа двух турбокомпрессоров в системе регистрового наддува [12–14].

Шанхайский университет провел испытания трехфазовой регистровой системы наддува на дизеле 6ЧН11,4/13,5 мощностью 184 кВт при 2200 об/мин при работе по внешней характеристике (рис. 37) [12].

Система наддува включает два параллельно работающих турбокомпрессора (большой ВТС и малый STC) с клапанами управления на входе

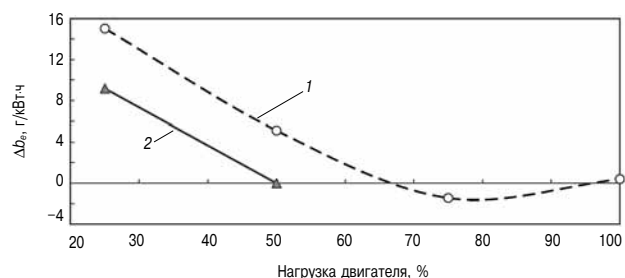


Рис. 36. Снижение удельного расхода топлива при отключении одного из двух турбокомпрессоров на двигателе 8UEC60LSII (кривая 2)

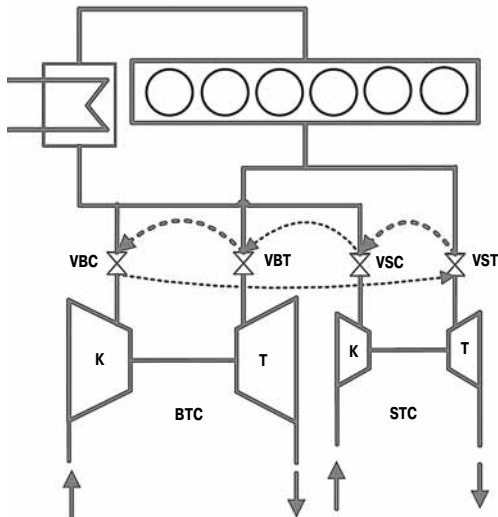


Рис. 37. Схема трехфазного регистрового наддува
BTC — большой турбокомпрессор; STC — малый турбокомпрессор; VBC, VBT, VSC, VST — клапаны управления на входе в турбину и выходе из компрессора большого и малого ТК

в турбину и на выходе из компрессора. Для оптимизации работы системы наддува в качестве большого ТК был выбран турбокомпрессор ТВР4 фирмы «Honeywell», а в качестве малого — турбокомпрессор RHF5 фирмы ИНИ. Характеристики компрессоров обеспечивают положение расходной характеристики двигателя в зоне максимальных КПД (рис. 38–39).

Показатели двигателя при работе по внешней характеристике были зарегистрированы сначала при работе с каждым компрессором по отдельности, а затем с двумя турбокомпрессорами одновременно. При работе с турбокомпрессором STC характеристика двигателя была получена только до 1700 об/мин, а с турбокомпрессором BTC и при совместной работе двух турбокомпрессоров — во всем диапазоне частот вращения

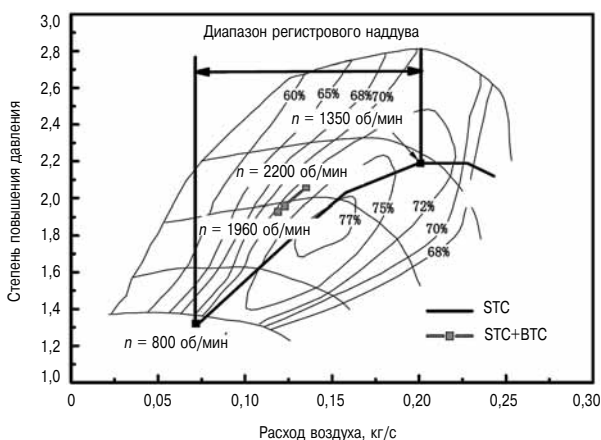


Рис. 38. Характеристика компрессора ИНИ RHF5 (STC) с нанесенной расходной характеристикой двигателя

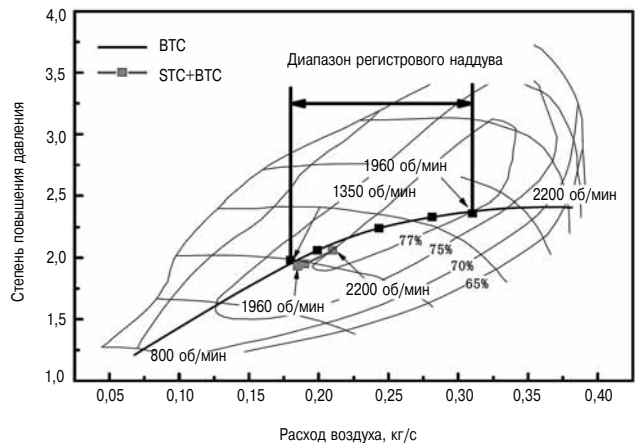


Рис. 39. Характеристика компрессора Honeywell ТВР4 (BTC) с нанесенной расходной характеристикой двигателя

(рис. 40). Точка пересечения кривых удельных расходов топлива была принята за точку переключения турбокомпрессоров. До частоты вращения 1350 об/мин двигатель работает только с STC, затем переключается на работу с BTC до 1960 об/мин, а затем работают оба ТК. На рис. 40 показано существенное снижение расхода топлива на пониженных частотах вращения при работе двигателя с трехфазной системой регистрового наддува.

В докладе [13] анализируется регистровая система наддува с разделением процессов управления впускным потоком воздуха и выпускным потоком газа. Она состоит из двух турбокомпрессоров (большой и малый), работающих параллельно, двух труб впуска (J1, J2), двух вращающихся клапанов (F1, F2), трех выпускных труб (P1, P2 и P3), и трех выпускных вращающихся клапанов (F4, F5 и F6) (рис. 41).

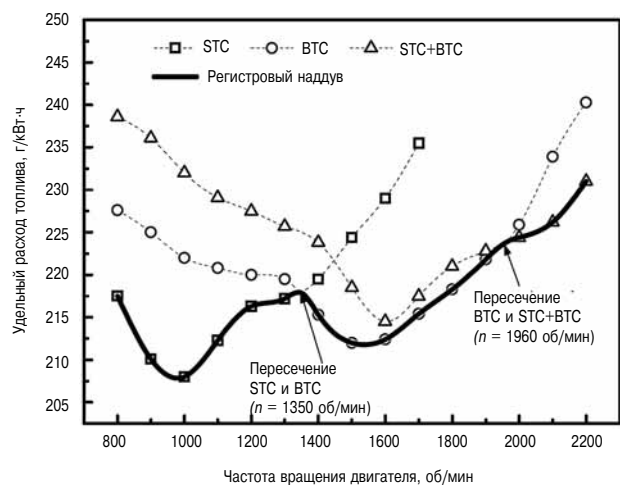


Рис. 40. Удельный расход топлива при работе двигателя по внешней характеристике с трехфазной системой регистрового наддува

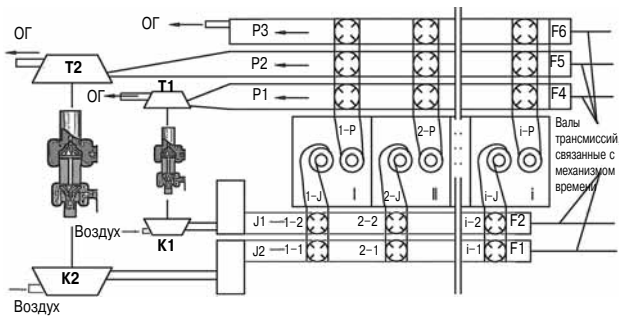


Рис. 41. Регистровая система наддува с разделением потоков впуска–выпуска

Соотношение расходов воздуха через малый и большой ТК составляет 1:3 на номинальном режиме работы двигателя, поэтому авторы считают, что два турбокомпрессора новой системы наддува имеют диапазон расходов, который соответствует четырем малым турбокомпрессорам традиционной регистровой системы наддува (рис. 42).

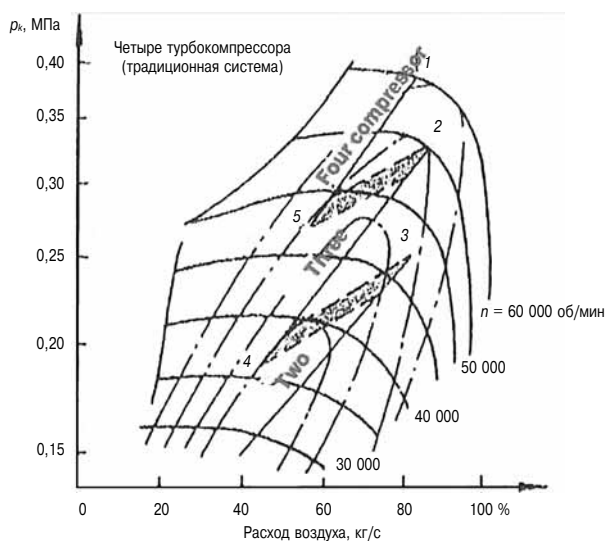
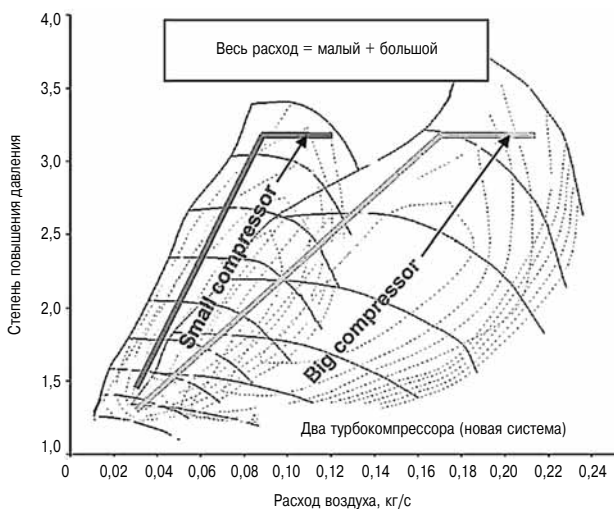


Рис. 42. Характеристики настройки компрессоров новой и традиционной регистровой системы наддува

Выпуск ОГ выполняется в соответствии с фазами газораспределения в три коллектора: из первого коллектора ОГ поступают в малый ТК (высокого давления) в начальный период выпуска с высоким давлением. Из второго коллектора ОГ направляются в большой ТК (низкого давления) с давлением и расходом газа, соответствующими режиму работы двигателя. В третий коллектор ОГ перепускаются мимо турбокомпрессоров для управления выпуском в двух других коллекторах.

В традиционном регистровом наддуве каждый цилиндр имеет только один такт выпуска и один впуска воздуха определенной продолжительности. В разделенной регистровой системе наддува выпуск разделен на три последовательные фазы, а впуск — на две фазы, которыми можно управлять. Отличие этой системы наддува от обычной регистровой системы состоит в отсутствии переключения на режим работы с одним или двумя ТК, которые работают одновременно при любой нагрузке двигателя, и расход воздуха на входе изменяется без скачка. При работе двигателя на номинальном режиме давление воздуха на выходе из обоих ТК одинаковое. При пониженных частотах вращения двигателя воздух низкого и высокого давления поступает в цилиндр последовательно в требуемом количестве с разделением подачи: малый ТК подает воздух высокого давления, а большой — более низкого.

Система подачи воздуха в двигатель и газообмена обеспечивается с помощью вращающихся клапанов (рис. 43), которые конструктивно идентичны для воздуха и газа.

По оценке авторов эта система наддува позволяет снизить расход топлива на номинальном режиме на 2 % за счет снижения потерь на насосных ходах.

Фирма «Mitsubishi» предлагает регистровую систему наддува для двухтактных малооборотных дизелей, состоящую из двух турбокомпрессоров — большого и малого (рис. 44).

На низких нагрузках работает только большой турбокомпрессор, а малый включается в работу на высоких нагрузках, когда давление воздуха, создаваемого им, больше давления продувочного воздуха в ресивере. Эта система была испытана

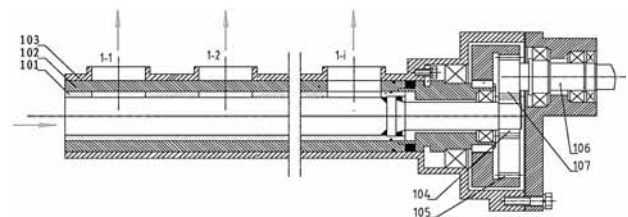


Рис. 43. Продольный разрез вращающегося клапана системы газообмена

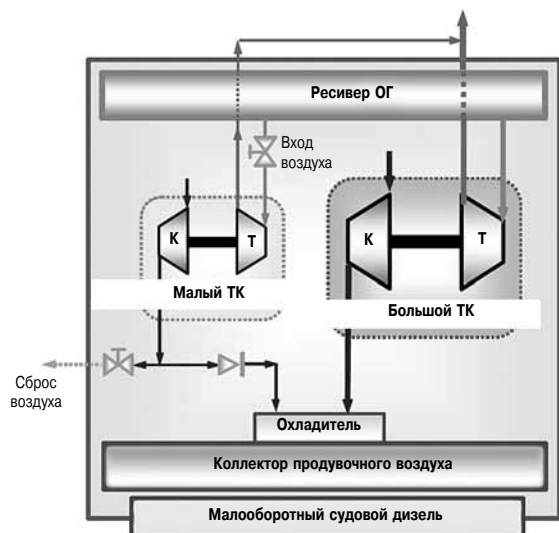


Рис. 44. Схема регистрового наддува фирмы «Mitsubishi»

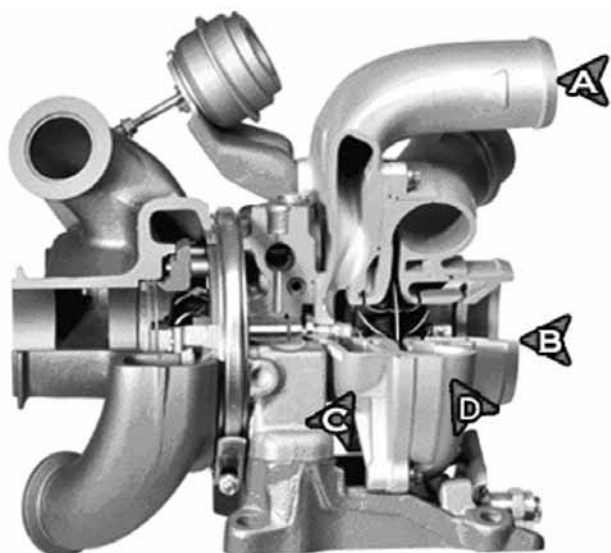


Рис. 45. Турбокомпрессор VNT DualBoost для регистрового наддува (двухстороннее колесо компрессора, два входа в компрессор, регулируемая турбина)

на двигателе 6S60MC. Данные испытаний не приводятся.

Фирма «Honeywell» разработала регистровую систему наддува с одним турбокомпрессором для автомобильной промышленности (рис. 45) [15].

Регистровый турбокомпрессор — это, по существу, две системы наддува в одном агрегате. Компрессор имеет двухстороннее колесо с единым диском (стрелки С и D вход в колесо), воздух к которому подводится по двум каналам в одном корпусе (стрелки А и В — два входа). Каждая сторона колеса компрессора имеет свои размеры проточной части, что позволяет пропустить различные расходы, а в целом такое колесо увеличивает расход воздуха почти в два

раза. Корпус турбины один, но с регулируемой турбиной, что позволяет обеспечить требуемую пропускную способность. Конструкция агрегата наддува очень компактна и проста, так как разработка велась для применения на автомобилях.

1.4. Перепуск газа

Самый простой способ улучшения топливной экономичности дизеля при работе на малых нагрузках — перепуск газа перед турбиной (байпас). При этом турбокомпрессор за счет уменьшения пропускной способности турбины настраивается на более высокие степени повышения давления на номинальной мощности. При малых нагрузках дизеля турбокомпрессор работает без перепуска. При достижении давления наддува, соответствующего ограничению частоты вращения турбокомпрессора или максимального давления в цилиндре, открывается байпасный клапан. С увеличением расхода газа через байпас КПД турбокомпрессора уменьшается, а расход топлива при этом возрастает. Поэтому потеря экономичности при работе дизеля вблизи номинальной мощности должна компенсироваться выигрышем при работе на низких нагрузках.

По данным фирмы MAN [1], за счет перепуска 7 % ОГ и снижения КПД турбокомпрессора на номинальной мощности двигателя на 5 % (при

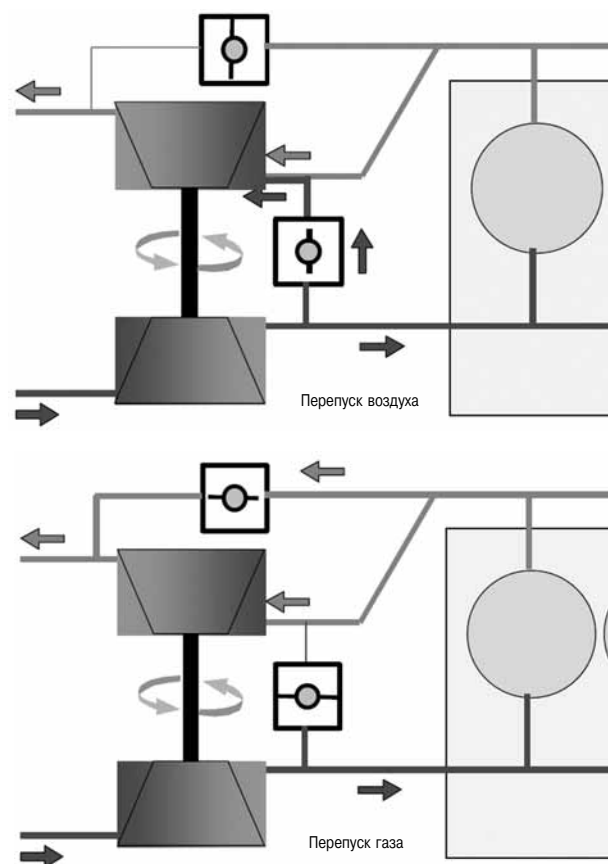


Рис. 46. Схема перепуска воздуха и газа

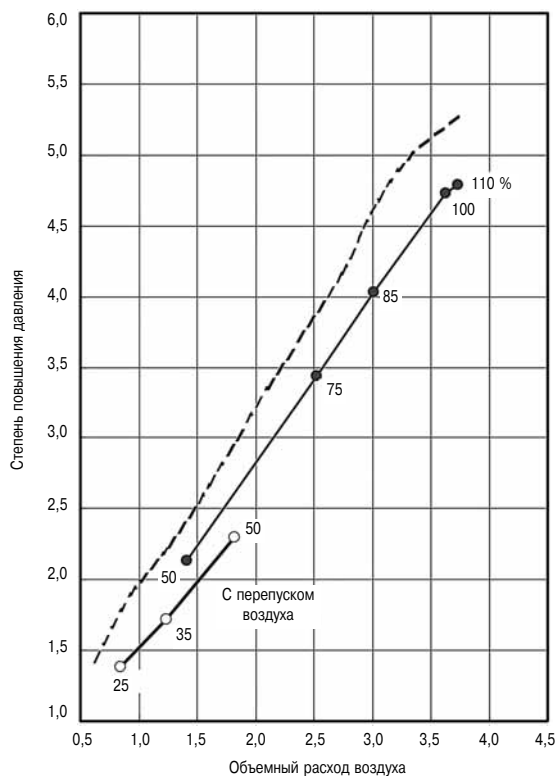


Рис. 47. Расходные характеристики двигателя 28АНХ

высоком исходном КПД турбокомпрессора) ожидается эквивалентное увеличение удельного расхода топлива приблизительно на 1,7 г/кВт·ч. При этом снижение расхода топлива на малых нагрузках будет приблизительно вдвое больше (см. рис. 35). Как правило, неуправляемый перепуск («открыто» или «закрыто») рассматривается как точка перехода, которая должна быть настроена на ограничение максимального давления наддува.

В ряде случаев для повышения эффективности работы двигателя во всем диапазоне нагрузок применяют не только перепуск газа на турбине, но и перепуск воздуха с выхода компрессора на вход турбины. Например, фирма «Niigata» оборудовала такой системой двигатель типа 28АНХ с 6, 8 и 9 цилиндрами в диапазоне мощностей от 2200 до 3300 кВт (рис. 46) [16]. Перепуск воздуха выполняется в диапазоне нагрузок 25–50 %, что смещает характеристику совместной

работы двигателя и компрессора в зону более высокого КПД (рис. 47), а увеличенный расход газов через турбину повышает давление наддува.

Перепуск газа и воздуха также широко применяется на автомобильных двигателях [11].

Литература

1. Herbert Schmuttermair H., Fernandez A., Witt M. Fuel Economy by Load Profile Optimized Charging Systems from MAN. № 250, CIMAC 2010, Bergen.
2. Jakobsen S. B. Service Experience of MAN B&W Two Stroke Diesel Engine. № 17, CIMAC 2010, Bergen.
3. Ono Y. Solutions for better engine performance at low load by Mitsubishi turbochargers. № 15, CIMAC 2013, Shanghai.
4. Vesper N., Schneemann A., Kasper W., Wollmann B. Development of the high-speed diesel engine 20V8000 M71. Paper № 153, CIMAC 2007, Vienna.
5. Czerny L., Klotz H., Ruck J., Schmid U. Advanced turbochargers for high-performance supercharging systems, CIMAC 2001, Hamburg.
6. Czerny L., Wintruff I., Schmid U., Baumgarten J. Future Potential of Series 4000 Marine Engines. Paper № 156, CIMAC 2007, Vienna.
7. Stiesch G., Baumann H., Wachter V., Schmitz J., Teetz C. Utilizing Multiple Injections for Optimized Performance and Exhaust Emissions with the MTU Series 2000 Common Rail Marine Engines. Paper № 50, CIMAC 2007, Vienna.
8. Vesper N., Speetzen R., Glowacki C. Development of the Series 4000 IRONMEN workboat engine. № 200, CIMAC 2010, Bergen.
9. Ципленкин Г.Е., Дейч Р.С., Иовлев В.И., Коженков А.А. Обзор докладов по газотурбинному наддуву на конгрессе CIMAC 2007 // Двигателестроение. — 2008 — № 3. — С. 29–35.
10. Pierre J., Henry X., David W. VTG turbocharging — a valuable concept for traction application. № 116, CIMAC 2013, Shanghai.
11. www.Honeywell turbotechnologies VNT.
12. Cui Y., Deng K., Zhang Z. Transient performance of three phase sequential turbocharging with unequal size turbochargers. № 213, CIMAC 2013, Shanghai.
13. Xie G., Xie X.A. New Sequential Turbocharging System. № 334, CIMAC 2013, Shanghai.
14. Xie X., Xie G. Further Improved Performance of High-Turbocharged Four Stroke Diesel Engine With Split Exhaust Turbocharger System. № 338, CIMAC 2013, Shanghai.
15. www.Honeywell turbotechnologies VNT Sequential.
16. Imai K., Nagasawa H., Yamamoto H., Kato S., Sonobe K. Development of NIIGATA new medium-speed diesel engine «28АНХ». № 165, CIMAC 2010, Bergen.
17. Sakabe H., Hosokawa N. Cutting edge technologies of UE engine for higher efficiency and environment. № 186, CIMAC 2010, Bergen.

(Продолжение следует)