

Новый газопоршневой двигатель мощностью 10,6 МВт

компании MAN Diesel & Turbo SE

Dr.-Ing., Rainer Golloch – MAN Diesel & Turbo SE

В статье представлены основные технические характеристики нового газопоршневого двигателя 20V35/44G компании MAN Diesel & Turbo SE. Мощность двигателя составляет 10,6 МВт, КПД – 48,4 %. При его разработке реализовано большое количество технических инноваций – в результате достигнут высокий уровень надежности двигателя в эксплуатации и низкие уровни эмиссии.

In brief

The new 10.6 MW gas engine from MAN Diesel & Turbo SE.

With the new 20V35/44G gas engine, MAN Diesel & Turbo SE has significantly extended its engine portfolio for stationary energy generation. During development, it was possible to illustrate output, consumption and emissions values with which the engine has established an excellent position in the competitor environment.

With a cylinder output of 530 kW, the gas engine achieves effective efficiency level of 48.4% and in the same time complies with all currently valid emissions regulations. Thus, MAN Diesel & Turbo SE is making its contribution to reducing environmentally harmful CO₂ emissions. The engine features many technical innovations. MAN Diesel & Turbo SE already has a customer for the first four 20V35/44G engines, which will supply electrical power to the public grid from autumn 2013.

Газопоршневые двигатели все чаще находят применение в составе стационарных и судовых энергетических установок. Основными критериями при этом являются невысокая по сравнению с дизельными двигателями стоимость топлива и низкие уровни эмиссии. Как ожидается, цены на природный газ, в связи с увеличением объемов его добычи, останутся ниже, чем стоимость жидких видов топлива.

Газовые двигатели большой мощности доминируют при использовании в составе стационарных электростанций. Согласно прогнозам, наиболее востребованы будут двигатели мощностью от 7,5 МВт. В связи с этим компания MAN создала новый среднеоборотный двигатель 20V35/44G мощностью 10 МВт (рис. 1). Существует две основные сферы применения газопоршневых двигателей такого класса мощности: электростанции простого цикла и когенерационные станции.

При разработке нового двигателя особое внимание уделялось достижению высоких значений КПД и энтальпии выхлопных газов. Было проведено большое количество теорети-

ческих и экспериментальных исследований для оптимизации процессов горения, разработки систем смазки и охлаждения, а также основных компонентов двигателя.

По сравнению с конкурентными моделями, двигатель 20V35/44G имеет самую высокую мощность на цилиндр – 530 кВт. В исполнении с 20 цилиндрами обеспечивается выходная мощность 10600 кВт. В связи с невысокой номинальной частотой вращения коленвала и средними показателями давления, трибомеханические нагрузки на компоненты двигателя низкие. С учетом жесткости конструкции двигателя это обеспечивает надежную эксплуатацию и низкие эксплуатационные расходы. В табл. 1 представлены основные технические параметры двигателя 20V35/44G.

Базовый двигатель

Базовый двигатель был специально оптимизирован для стационарного применения с целью обеспечения высокого КПД и низких эксплуатационных расходов. Проведенные исследования с использованием методов компьютерного

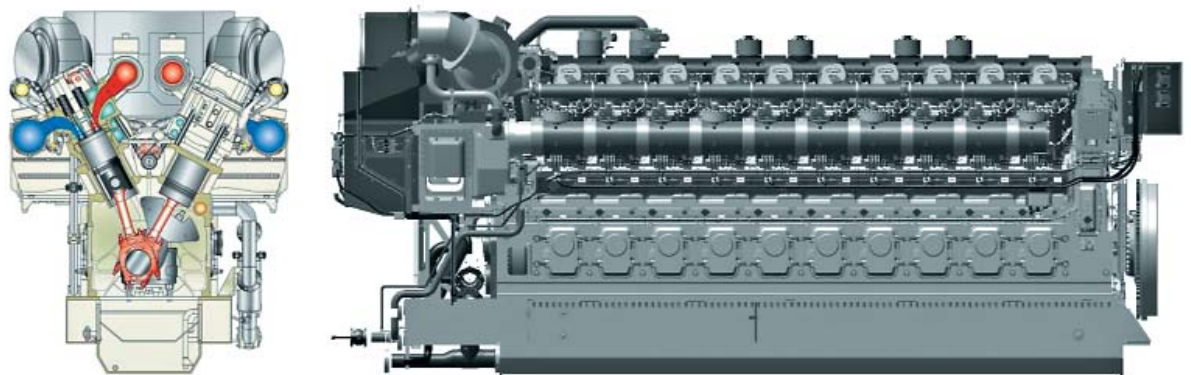


Рис. 1. Разрез и вид сбоку двигателя 20V35/44G

моделирования позволили добиться высокой эффективности работы всех компонентов при их небольшом весе. В результате было достигнуто однородное распределение напряжений в блоке цилиндров. С учетом потерь на трение угол развала цилиндров выбран 55°.

Блок цилиндров выполнен в виде моноблока из высокопрочного чугуна. На раме двигателя продольно расположен главный канал для подачи масла на коленвал и основные подшипники. Благодаря применению центрально расположенного кулачкового вала, удалось сконструировать очень компактный блок цилиндров.

Двигатель крепится к сварной раме, что обеспечивает жесткость конструкции. Рама служит резервуаром для смазочного масла, а также основанием для модуля турбонагнетателя. Ниже турбонагнетателя к блоку цилиндров крепятся масляные и водяные насосы. Соединение с электрогенератором осуществляется с помощью эластичной муфты.

Кривошипно-шатунный механизм

Полномасштабные исследования параметров коленвала позволили выбрать оптимальные размеры диаметра и ширины подшипников, расстояние между подшипниками, диаметр шатунной шейки, что обеспечивает надежность работы коленвала и шатунов. С учетом рекомендаций и норм URM (Unified Requirements of the International Association of Classification Societies – Унифицированные требования Международной ассоциации классификационных организаций) определялось распространение нагрузок и усилий, проводились расчеты крутильных вибраций, последовательность зажигания и порядок работы цилиндров, для того чтобы обеспечить максимально бесшумную работу двигателя. Несмотря на высокую цилиндрическую мощность, коленвал изготовлен из стандартных материалов.

Шатун состоит из трех частей, что обеспечивает простоту технического обслуживания. Масло в поршень подается через канал в шатуне, который оснащен обратным клапаном, обеспечивающим необходимый объем масла для эффективного охлаждения поршня. Поршень имеет чугунную нижнюю часть и стальную головку (которые являются собственной разработкой компании MAN). Головка поршня используется также для настройки степени сжатия. На рис. 2 показан кривошипно-шатунный механизм, оснащенный демпфером крутильных колебаний. Все подшипники обеспечены необходимым количеством масла при требуемом давлении. Кроме того, гарантируется отсутствие избыточного давления и объемов масла в маслосистеме.

Табл. 1. Основные технические параметры двигателя 20V35/44G (50 Гц)

Наименование параметров	Значение
Диаметр и ход поршня, мм	350/440
Рабочий объем цилиндра, л	42,3
Расстояние между цилиндрами, мм	630
Угол развала цилиндров, °	55
Частота вращения, об/мин	750
Мощность на цилиндр, кВт	530
Среднее эффективное давление, МПа	2
Номинальная мощность, кВт	10600
Средняя скорость поршня, м/с	11
Эффективный КПД двигателя*, %	48,4
Габариты (ДхШхВ), мм	9900x4450x4500
Масса (сухая), кг	113500

* ISO 3046-1, TA-Luft, нагрузка 100 %, метановое число ≥ 80
Насосы расположены на двигателе

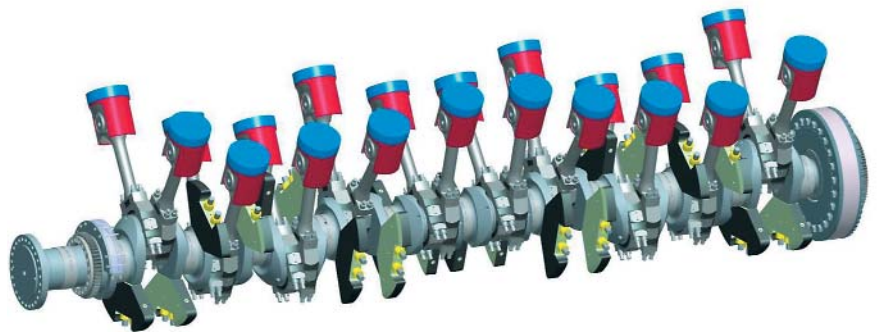


Рис. 2. Кривошипно-шатунный механизм, оснащенный демпфером крутильных колебаний

Механизм газораспределения

Компоненты механизма газораспределения двигателя (рис. 3) должны выдерживать высокие динамические напряжения, возникающие в результате работы по циклу Миллера. При этом большое внимание при разработке уделялось максимальному снижению массы двигателя. Впускные и выпускные клапаны приводятся в действие расположенным по центру кулачковым валом. Производимое кулачками движение передается через качающийся рычаг с роликовым толкателем на шток, а затем – через коромысла непосредственно на клапан. Коромысла уста-



Рис. 3. Один модуль механизма газораспределения

Рис. 4. Силовой блок с каналами подачи воздуха и отвода выхлопных газов



новлены в подшипниках, через которые смазочное масло подается в механизм газораспределения. Через отверстия в коромысле и штоке масло подается к подшипникам качающегося рычага. Таким образом, значительно снижается объем необходимых каналов и трубок в головке цилиндра для подачи масла в механизм.

Благодаря подобранным парам трения, клапаны и седла менее подвержены износу. Расположенный снизу механизм поворота клапана обеспечивает равномерный износ всех клапанов. Интенсивное охлаждение позволило достигнуть низких рабочих температур клапанов при эксплуатации двигателя.

Силовой модуль с каналами подачи воздуха и отвода выхлопных газов

Силовой блок (рис. 4) включает головку цилиндра с соответствующим клапаным механизмом, систему зажигания, опорное кольцо и гильзу цилиндра. Основными задачами при разработке головки цилиндра были высокая прочность компонентов, интенсивное охлаждение, низкие аэродинамические потери в каналах подачи газа и компактное расположение элементов системы зажигания.

Головка цилиндра крепится к опорному кольцу с помощью стягивающих болтов, гильза подвешивается к опорному кольцу. Охлаждение силового блока осуществляется через опорное кольцо. Каналы подачи воздуха и

выхлопной канал подсоединены к головке цилиндра. Впервые для двигателей, сконструированных MAN Diesel & Turbo SE, выхлопные каналы изготавливались из двухстенных трубок, пространство между которыми заполнено изоляционными материалами. В результате обеспечивались низкие температуры на поверхности трубок без дополнительной системы изоляции.

Необходимый для горения топливный газ подается через дозирующие клапаны, установленные на каждом цилиндре. Это дает возможность регулировать состав газозвушной смеси для каждого цилиндра индивидуально. Газозвушная смесь образуется непосредственно в канале подачи топлива.

Система запуска

Запуск двигателя производится с помощью пневмостартера, который соединен с маховиком через редуктор. Необходимое давление воздуха при этом составляет 3 МПа.

Зубчатая передача стартера подключается только в момент запуска двигателя, а после успешного пуска возвращается в положение холостого хода (нейтральное положение). Стартер также используется в качестве валоповоротного устройства в период технического обслуживания или монтажных работ в режиме горячего резерва.

Блок турбонагнетателя

Двигатель оснащен одноступенчатым турбонагнетателем выхлопных газов с двухступенчатым блоком промежуточного охлаждения (интеркулером). Модуль турбонагнетателя поставляется в сборе и крепится к двигателю во время монтажа (рис. 5). Он имеет небольшие габариты и обеспечивает низкий уровень вибрации за счет жесткости конструкции.

Конструкция проточных частей турбонагнетателей и интеркулеров обеспечивает низкие потери давления в воздушном тракте и в каналах подачи выхлопных газов. В результате

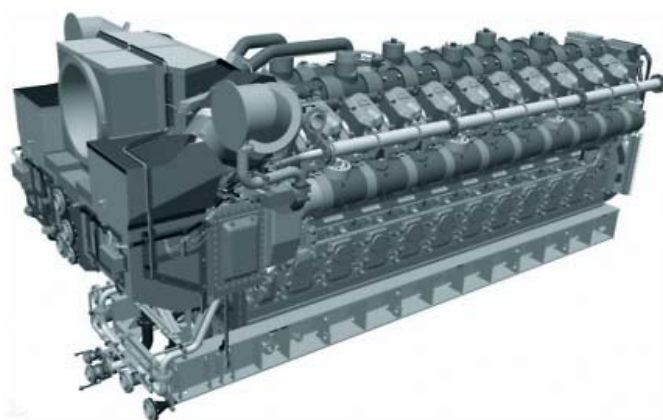
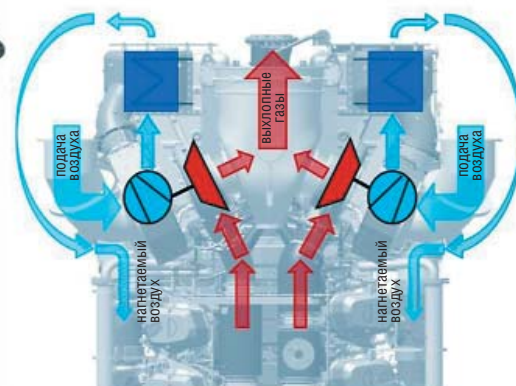


Рис. 5. Двигатель с модулем турбонагнетателя



достигнут оптимальный уровень воздушного потока, подаваемого на рабочие колеса турбо-нагнетателя.

Воздух поступает в компрессор через два боковых патрубка, выхлопные газы отводятся через центральный выхлопной канал. Турбо-нагнетатели TCR оснащаются блоком VTA (Variable Turbine Area – Регулируемая геометрия соплового аппарата), обеспечивающим оптимальный состав газовой смеси. Преимуществами данных турбоагнетателей являются высокая удельная мощность и КПД, а также низкая тепловая нагрузка на компоненты модуля.

Для охлаждения нагнетаемого воздуха применяется один интеркулер для каждого ряда цилиндров, который закреплен сбоку на корпусе двигателя. Для расширения диапазона рабочих температур воздуха на входе двигателя используется байпас компрессора.

На модулях турбокомпрессора расположены точки подсоединения к системам подачи масла, охлаждающей жидкости, топливного газа, воздуха и выхлопных газов. Это обеспечивает простое и компактное присоединение к системам электростанции.

Газообмен и формирование топливоздушной смеси

В процессе разработки двигателя были исследованы и оценены различные профили потока в каналах нагнетания воздуха и выхлопных газов, а также их подсоединение к головке цилиндра. В результате термодинамических и механических расчетов разработаны оптимальные профили каналов подачи воздуха и отвода выхлопных газов, а также определены требования к качеству материалов и конструкции каналов.

Особое внимание уделялось разработке каналов всасывания и выхлопа на крышке цилиндра. Они расположены ассиметрично, что дает определенные преимущества. В результате были созданы каналы с высокими коэффициентами расхода, что обеспечивает высокую эффективность процесса горения в цилиндре.

Топливный газ подается в цилиндр через газодозирующий клапан. В начале процесса горения в камере сгорания находится однородная газозвушная смесь. Учитывая значительное влияние состава смеси на уровни эмиссии и работу двигателя, был проведен ряд исследований по процессам горения в цилиндре, а также по конструкции каналов подачи смеси в цилиндр. В дополнение к таким регулируемым параметрам, как давление газа, момент начала и продолжительность подачи газа, положение и форма сопла подачи газа имеют большое

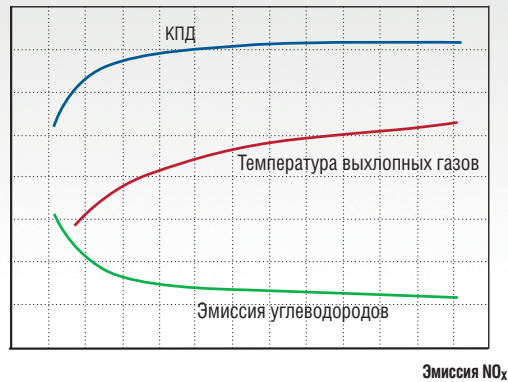


Рис. 6. Результаты испытаний по несгоревшим углеводородам, температуре выхлопных газов по отношению к соответствующим уровням эмиссии NO_x

значение. Были исследованы несколько вариантов для достижения максимальной однородности газозвушной смеси в камере сгорания.

Процесс горения

Для обеспечения работы двигателя по циклу Миллера были обеспечены высокие значения геометрической степени сжатия и степени повышения давления в турбоагнетателе. Данная комбинация обеспечивает высокий КПД двигателя при низких уровнях эмиссии (рис. 6). Путем оптимизации конструкции и профиля камеры сгорания и предварительной подготовки газозвушной смеси возможно дальнейшее повышение КПД двигателя при расширении рабочего диапазона без детонации и срыва пламени.

Процессы горения отрабатывались на опытном одноцилиндровом двигателе, который был специально создан для проведения исследований (рис. 7). Пилотный образец был изготовлен в течение 11 месяцев.

После запуска опытного двигателя в эксплуатацию был успешно проведен ряд исследований по процессам горения. В результате модернизированы некоторые компоненты силового блока с точки зрения тепловой нагрузки, а также распределения нагрузочных усилий при эластичной деформации. На основании полученных данных оптимизированы модели расчетов FEM.

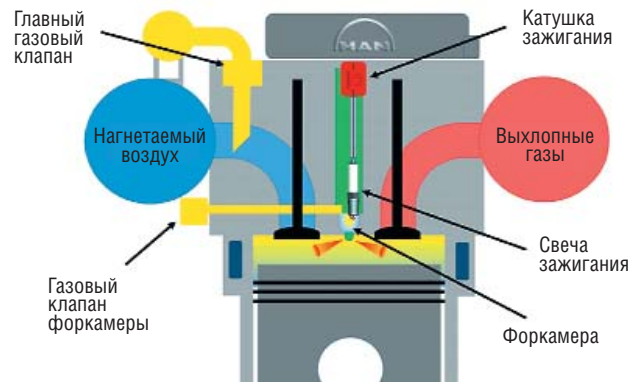


Рис. 7. Система подачи и воспламенения газа

➤ Фото 1.
Опытный двигатель
20V35/44G
на испытательном стенде
в г. Аугсбург, Германия



На третьем этапе оптимизированы процессы горения с точки зрения КПД, рабочего диапазона двигателя и уровней эмиссии. Окончательная доработка компонентов осуществлялась в процессе испытаний в составе полномасштабного двигателя.

Система зажигания

Система зажигания двигателя 20V35/44G имеет запальное устройство и мощную катушку зажигания, которая вырабатывает запальную искру высокого напряжения. Свеча зажигания находится в форкамере. Топливный газ направляется непосредственно в форкамеру через отдельный газодозирующий клапан.

Вместе с обедненной смесью из главной камеры сгорания, которая подается в форкамеру при такте сжатия, обеспечивается почти стехиометрический состав, который воспламеняется с помощью свечи зажигания. Поток пламени из форкамеры используется как усилитель для воспламенения смеси в основной камере сгорания.

Система автоматизации, контроля и управления

Для двигателя 20V35/44G была разработана передовая система управления SaCoSone (Safety and Control System on engine). Модульная конструкция системы обеспечивает набор различных функций управления, безопасности и контроля, позволяя проводить эффективную диагностику двигателя в режиме on line. Все модули системы SaCoSone независимы и соединены друг с другом резервируемыми системными шинами. Таким образом, достигается высокая надежность и эффективность работы системы. Для более удобного управления двигатель оснащен сенсорным монитором TFT, на который выведены эксплуатационные параметры двигателя.

В систему SaCoSone входят модули, обеспечивающие безопасность и аварийное предупреждение, которые, как и сенсоры, имеют двойное резервирование для обеспечения мак-

симальной надежности двигателя. При выходе какого-либо сенсора из строя система автоматически переходит на считывание сигнала с исправного датчика. Детальная информация по диагностике двигателя выводится на монитор для своевременного предотвращения аварийных ситуаций.

Для облегчения интеграции в другие системы верхнего уровня SaCoSone оснащена гибким интерфейсом, при этом доступны протоколы Profibus DP, Modbus over TCP, Modbus RTU. В системе предусмотрены компоненты, обеспечивающие удаленный доступ к ней через Интернет. Таким образом, диагностика и регулировка двигателя может быть выполнена специалистами MAN Diesel & Turbo в любое время и в любом месте.

Концепция безопасности

Гарантия безопасной эксплуатации оборудования, поставляемого компанией MAN Diesel & Turbo, это не только ключевой показатель качества продукции, но и неотъемлемая часть стратегии компании.

При разработке системы управления принимались во внимание специфические требования к газопоршневым двигателям и международные стандарты. В соответствии с требованиями АТЕХ двигатель был поделен на зоны, которые отражают присутствие взрывоопасной атмосферы, и на этом основании оценивается вероятность взрыва. С учетом такой информации данные зоны оснащаются пассивными или активными устройствами, обеспечивающими безопасность двигателя.

Стандартно двигатель 20V35/44G оснащается системой мониторинга температуры брызг масла и коренных подшипников, а также детекторами масляного тумана. Благодаря детекторам гарантируется безопасная работа двигателя, поскольку источники возгорания можно обнаружить на ранних стадиях. Клапана сброса давления на крышке картера двигателя используются как пассивные устройства по обеспечению безопасности.

Мониторинг процесса горения исключает еще один возможный риск — неполное сгорание газовой смеси в случае пропуска воспламенения. Система безопасности и аварийной сигнализации SaCoSone включает в себя сенсоры и детекторы свечей зажигания, газовых клапанов, температуры выхлопных газов и детонации двигателя. Она способна мгновенно определить момент пропуска воспламенения по отклонению параметров компонентов системы зажигания от номинальных значений или слишком насыщенную топливную смесь. Таким образом, несгоревшая газозоудушная

смесь сможет попасть в выпускной коллектор только в течение нескольких циклов. В качестве пассивных мер при этом используются клапаны сброса давления на выпускном коллекторе.

Применение и опыт эксплуатации

С августа 2011 года опытный двигатель 20V35/44G работает на испытательном стенде компании MAN Diesel & Turbo в г. Аугсбург (фото 1). В процессе опытно-промышленной эксплуатации проводится доработка компонентов различных систем двигателя, отрабатываются контрольные карты и система управления, проводятся исследования эксплуатационных параметров двигателя при работе на различных топливных смесях.

Испытания включают в себя различные измерения: температур, нагрузок, крутильных колебаний и вибрации в основных узлах кривошипно-шатунного механизма, механизма газораспределения, силового модуля и турбонагнетателя. Результаты испытаний показали отличные рабочие характеристики поршня, поршневых колец, коренных и шатунных подшипников, а также механизма газораспределения. Уровень вибрации также был достаточно низким.

Новый двигатель 20V35/44G в основном предназначен для стационарных электростанций, однако при разработке учитывалась возможность применения двух вариантов – «Е» и «Т».

Вариант «Е» предусматривает использование двигателя преимущественно для выработки электроэнергии, электрический КПД при этом составляет 47,5 % (ISO 3046-1, TA-Luft, метановое число 80, $\cos\phi$ 0,9). При варианте «Т» используется также и тепловая мощность двигателя – при полной нагрузке температура выхлопных газов составляет более 350 °С. При этом варианты «Е» и «Т» различаются только номенклатурой контрольно-измерительной аппаратуры.

Для управления подачей воздуха для горения двигатель оснащен турбонагнетателем с регулируемым сопловым аппаратом, регулируемым байпасом компрессора и отсечным клапаном. Таким образом, может обеспечиваться оптимальный алгоритм управления коэффициентом избытка воздуха (лямбда-регулирование) для каждой области применения двигателя. Например, лямбда-регулирование с помощью байпаса компрессора, по сравнению с другими методами, имеет преимущество в более быстром приеме нагрузки при работе в островном режиме.

В резервном режиме двигатель способен выйти на номинальную мощность в течение нескольких минут (рис. 8), что очень важно

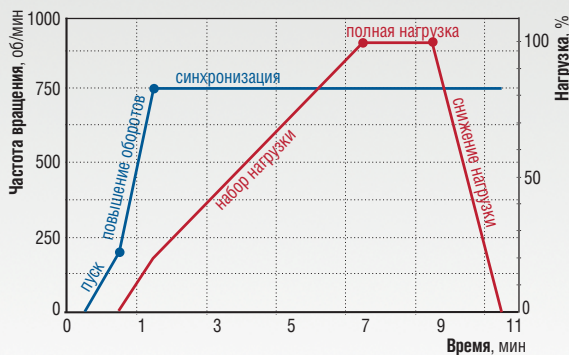


Рис. 8. График пуска и выхода на номинальную мощность двигателя 20V35/44G

при работе электростанции в сеть для компенсации колебаний мощности в сети. В дальнейшем данный фактор будет приобретать все большее значение, поскольку прогнозируется быстрое развитие ветроэнергетики и электростанций на солнечных батареях. Кроме того, в двигателе предусмотрена возможность работы в широком диапазоне температур окружающего воздуха без потери мощности.

Заключение

Представив на рынок новый двигатель 20V35/44G, компания MAN Diesel & Turbo существенно расширила свой модельный ряд газопоршневых двигателей, предназначенных для работы в составе стационарных электростанций. В процессе испытаний двигатель подтвердил все заявленные характеристики по мощности, КПД, уровням эмиссии, которые на данный момент являются лучшими по сравнению с конкурентами. При мощности 530 кВт на цилиндр двигатель имеет эффективный КПД 48,4 % при соблюдении всех экологических норм.

При разработке двигателя использовалось множество технических инноваций и передовых программ компьютерного моделирования. В настоящее время уже заключены контракты на поставку двигателей 20V35/44G. Ввод первого энергоблока в коммерческую эксплуатацию запланирован на осень 2013 года.

Продолжение статьи по вопросам применения двигателя 20V35/44G читайте в №5-2012 г.

ООО «МАН Дизель и Турбо Рус»
Россия, 107023, Москва,
ул. Электровзводская, д. 27, стр. 8
Тел. +7 495 258 3670
Факс +7 495 258 3671
info-ru@mandieselturbo.com
www.mandieselturbo.ru