

А. А. Троицкий – ООО «Турбомашины»

В течение последних 10 лет развитие технологий газопоршневых двигателей происходило наиболее активно. Это связано с ужесточением экологических требований, необходимостью повышения КПД установок, а также их уровня надежности и ресурса работы при снижении эксплуатационных затрат. Министерство энергетики США (DoE) – активный участник этого процесса.

Программа ARES – завершен первый этап

В 2001 году в США была разработана и запущена в действие программа ARES (Advanced Reciprocating Engine Systems), участниками которой являются три ведущих производителя газопоршневых двигателей – компании Caterpillar, Waukesha и Cummins. Поддержку программы осуществляет ряд университетов и государственных научно-исследовательских лабораторий США. Они ответственны за разработку передовых материалов, систем подготовки топливовоздушной смеси, смазочных материалов, технологий горения и т. д. Финансирование проводимых исследований в рамках программы осуществляется Министерством энергетики на конкурсной основе.

Программа ARES охватывает мощностной ряд двигателей от 500 до 6500 кВт. Она разбита на три периода: 2001-2004 гг., 2004-2007 гг. и 2007-2010 гг. Для каждого из них поставлены конкретные цели и задачи. На заключительном этапе каждого периода производители должны представить свои достижения и подтвердить их результатами испытаний.

Конечной целью программы к 2010 году является вывод на рынок энергетических установок на базе газопоршневых двигателей с КПД, составляющим 50% в простом цикле и более 90% в когенерационном цикле (полная утилизация тепла).

Стоимость установок должна быть не более \$450 за один кВт установленной мощности, затраты на техническое обслуживание – \$0,01 за кВт·ч. Уровень эмиссии NO_x не должен превышать 0,134 г/кВт·ч. Себестоимость вырабатываемой электроэнергии необходимо снизить на 10%. Установки должны обеспечивать высокую надежность в эксплуатации и ремонтпригодность, быть удобными в обслуживании.

Несмотря на достаточно смелые задачи и относительно небольшой период времени для их реализации, на начальном этапе было много сомнений по поводу финансирования исследований в области газопоршневых двигателей. Некоторые специалисты считали, что данное направление себя изживает и отсутствуют технологические возможности для его совершенствования. Однако после тщательного анализа перспектив программы стало очевидно, что эта область является одной из наиболее изученных. Накоплен огромный опыт эксплуатации газопоршневых установок, существует научный и технический потенциал для их дальнейшего развития. Анализ рыночной ситуации показал, что с большой долей вероятности спрос на рынке на энергетическое оборудование именно в этом классе мощности в период до 2020 будет стабильно повышаться.

На приведенных ниже схемах (рис. 1-7) показано место установок ARES на рынке по отношению к их видовым конкурентам. Что касается мощности установок, то самым востребованным на рынке распределенного производства энергии, по оценкам специалистов, является класс мощности 500...6500 кВт. При этом КПД двигателей ARES выше, чем у другого типа энергетического оборудования. Лишь в перспективе с ними смогут конкурировать по этому параметру топливные ячейки.

На фоне постоянно ужесточающихся экологических требований двигатели ARES также выглядят более чем привлекательно. Обеспечиваемый ими уровень эмиссии соответствует всем мировым стандартам, и работы в этом направлении продолжаются. При одинаковых эксплуатационных затратах стоимость вырабатываемой установками ARES электроэнергии заметно ниже, чем у других типов энергетического оборудования (за исключением ветряных

электростанций). Это тоже является серьезным конкурентным преимуществом на рынке.

На начальной стадии программы Министерство энергетики США разработало следующие основные технологические направления, развитие которых должно обеспечить достижение поставленных целей:

1. Передовые технологии зажигания. Более продолжительный срок службы системы зажигания, повышение надежности в эксплуатации.
2. Передовые технологии горения. Кардинальное снижение уровней эмиссии, повышение КПД двигателя. Разработка технологий по сокращению времени горения, снижение детонации, снижение вероятности перебоев зажигания. Разработка программ компьютерного моделирования процессов и разработки передовых концепций горения.
3. Разработка и использование передовых материалов и покрытий, необходимых для работы элементов конструкции двигателя при высоких температурах горения, а также антифрикционных материалов с целью снижения потерь на трение.
4. Снижение потерь при трении. Это направление является одним из наиболее приоритетных, так как более 50% таких потерь приходится на блок цилиндров.
5. Разработка передовых технологий и систем для очистки выхлопных газов двигателей, что особенно важно при снижении уровня эмиссии. Разработка специальных каталитических материалов. Применение систем SCR (selective catalytic reduction – селективное каталитическое подавление выбросов) и специальных фильтров для оксидов азота определены как наиболее перспективные направления.
6. Утилизация тепла выхлопных газов. Дополнительное количество тепла может быть получено путем развития технологий турбонаддува.

Для проведения исследований по данным направлениям были созданы рабочие группы, которые внедряли свои разработки на двигателях компаний Cummins, Caterpillar и Waukesha. Независимую поддержку по проведению исследований осуществляют Национальная лаборатория энергетических технологий (National Energy Technology Laboratory – NETL), Государственный университет Колорадо (Colorado State University – CSU) и Национальная лаборатория Аргонн (Argonne National Laboratory – ANL). Разработку технологий и создание систем лазерного зажигания для газопоршневых двигателей при работе на обедненной смеси взяла на себя NETL.

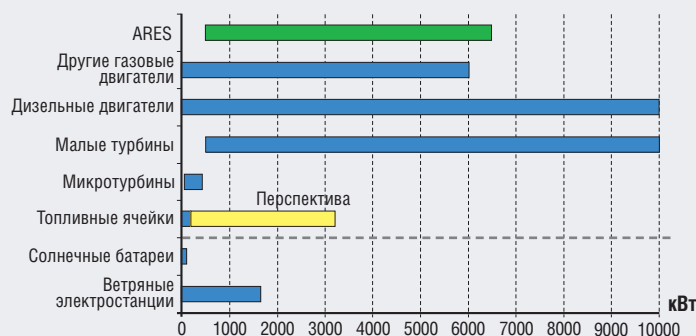


Рис. 1. Диапазон мощности различных типов энергетического оборудования

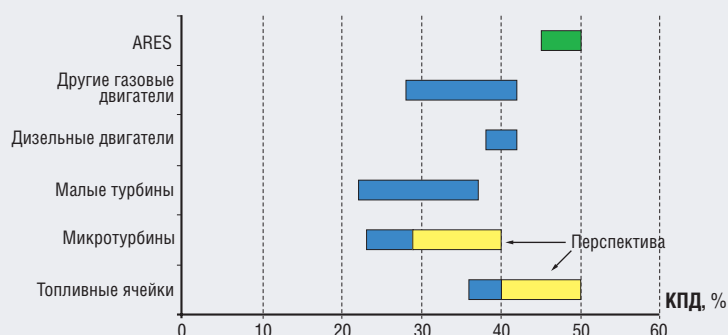


Рис. 2. КПД различных типов энергетического оборудования

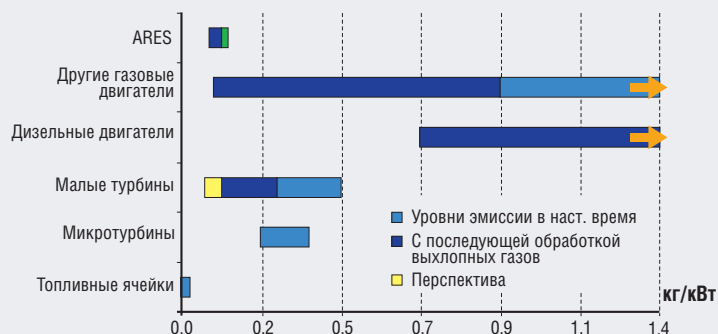


Рис. 3. Уровень эмиссии NOx для разных типов энергетического оборудования (базовая нагрузка)

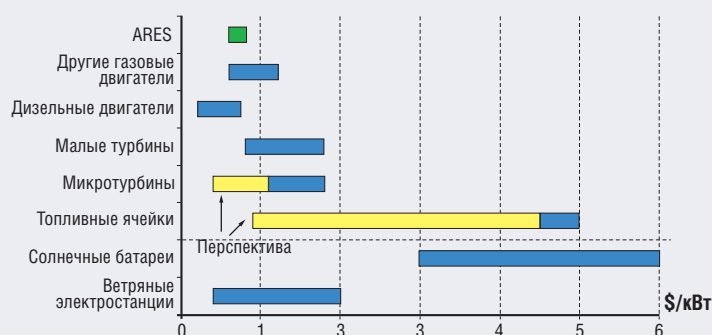


Рис. 4. Удельная стоимость энергетического оборудования



Фото 1. Базовый двигатель QSV91 компании Cummins

Исследованием процессов горения в цилиндрах с использованием передовых видеоскопов и компьютерных программ, созданием передового сенсорного оборудования для контроля горения и уровней эмиссии, а также компьютерным моделированием процессов горения с целью разработки технологий по снижению выбросов занимается ANL. Проведение исследований с целью снижения потерь при трении, разработку и создание керамических сенсоров для контроля уровней эмиссии осуществляет лаборатория Лос Аламос.

Cummins

Для выполнения программы ARES компания использует газопоршневые двигатели серии QSV и QSK, базовым выбран QSV91 мощностью 1832 кВт (фото 1). Приоритетными определены такие направления: получение высокой стабильности выдаваемой двигателем мощности, разработка передовых технологий сжигания предварительно обедненной смеси, повышение эксплуатационных параметров и улучшение конструкции различных подсистем и компонентов двигателя. В результате необходимо выйти на решение следующих задач:

- создание надежных и эффективных систем горения, увеличение срока их службы. Разработка передовых сенсоров для контроля и управления процессами горения;
- разработка более эффективных и кратковременных процессов сжигания топлива;
- разработка технологий подавления выхлопов NO_x ;
- разработка передовых высокотемпературных материалов и покрытий;
- снижение уровня детонации двигателя;

- повышение эффективности утилизации тепла выхлопных газов;
- уменьшение потерь при трении.

После выработки основных направлений исследований был определен состав рабочей группы во главе с компанией Cummins, а также зоны ответственности каждого участника в общем проекте. Для решения конкретных задач приглашены следующие организации:

Национальная лаборатория Oak Ridge — разработка передовых систем искрового зажигания; систем и технологий для повышения стабильности выдаваемой двигателем мощности;

Государственный университет Colorado — разработка систем для использования вспомогательного дизельного топлива с целью обеспечения стабильности выдаваемой мощности и повышения эффективности процессов горения; проведение их испытаний;

Ricardo Inc. — разработка компьютерных программ для создания модели систем впрыска и горения с использованием вспомогательного дизельного топлива;

Westport Innovations — разработка систем впрыска и горения HPDI (High Pressure Direct Injection — прямой впрыск под высоким давлением) для повышения мощности и КПД двигателя;

Delphi — разработка передовых систем впрыска топлива, инжекторов;

Национальная лаборатория Lawrence Livermore — изучение химической кинетики процессов при безыскровом зажигании, использование полученных данных для разработки систем зажигания HCCI;

Технологический институт Lund — разработка систем зажигания HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition — зажигание однородной смеси при высоком давлении);

Newage AVK SEG — создание передового генератора для использования в составе установки.

Кроме того, предусматривается работа двигателя по циклу Миллера, оснащение его более эффективным турбокомпрессором, использование процессов стехиометрического горения с рециркуляцией выхлопных газов (Exhaust Gases Recirculation — EGR). Эти работы будет проводить компания Cummins.

Первый этап программы был закончен в декабре 2004 года. В отчетном документе представлены основные результаты, достигнутые рабочей группой. В частности, для отработки новых технологий были запущены два испытательных стенда в Гранд Прери (штат Алберта) и Анахайме (штат Калифорния). Установка в Гранд Прери вырабатывала для энергосети 1600 кВт электроэнергии. По сравнению с работой на дизельном топливе достигнуто снижение уровня эмиссии NO_x на

85% и других газов на 20% без применения дополнительных систем подавления выбросов.

Аналогичная установка в Анахайме была запущена в эксплуатацию в начале 2004 года. Она оснащена внешними системами подавления выбросов SCR. Уже в начале эксплуатации при выдаче в сеть 1600 кВт электроэнергии были достигнуты уровни эмиссии ниже установленных. Проведенные испытания показали следующие результаты:

- использование системы HPDI позволило увеличить КПД двигателя на 5%, применение цикла Миллера также способствовало его повышению;
- в простом цикле КПД установки ARES составил 44%;
- расход топлива был снижен на 8%;
- предварительная оценка результатов испытаний системы зажигания достаточно оптимистична: планируется увеличение срока службы практически в 2 раза;
- прототип сенсоров для контроля и управления процессом горения подтвердил все заявленные параметры;
- практически достигнуты требуемые параметры турбоагнетателя;
- системы подавления выбросов SCR полностью обеспечили требуемые уровни выбросов NO_x. Определены поставщики необходимых каталитических материалов для данных систем.

Все достигнутые результаты и новые разработки специалисты компании применяют для модернизации существующих двигателей других серий а также при создании новых моделей.

На втором этапе были также определены технические и технологические задачи для реализации целей, поставленных в рамках программы ARES. Это необходимость разработки и внедрения высокоточного оборудования, сенсоров и датчиков для контроля и управления процессом горения и всей установкой в целом. Важно также создание передовых систем селективного каталитического подавления выбросов с целью максимального снижения их себестоимости и эксплуатационных затрат.

Caterpillar

Задачи, поставленные перед рабочей группой во главе с компанией Caterpillar, в общем виде выглядят так: на первом этапе достигнуть КПД установки 44%, уровня эмиссии NO_x – 0,67 г/кВт·ч. На втором и третьем этапах КПД должен быть 47% и 50% соответственно, уровень эмиссии NO_x – 0,134 г/кВт·ч.

Участниками проекта стали научные организации и производственные компании –

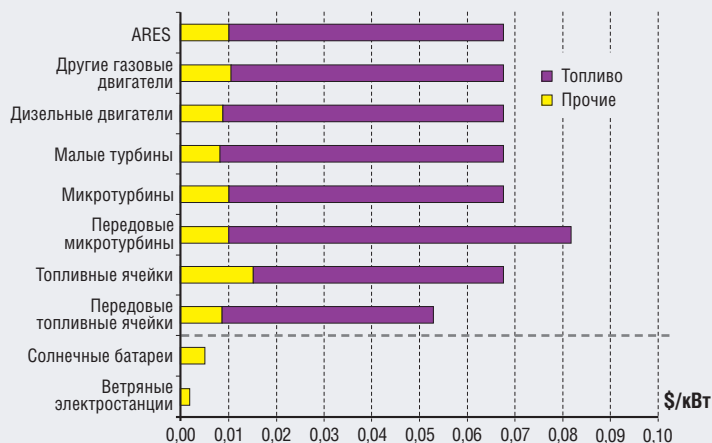


Рис. 5. Эксплуатационные затраты для различных типов энергетического оборудования

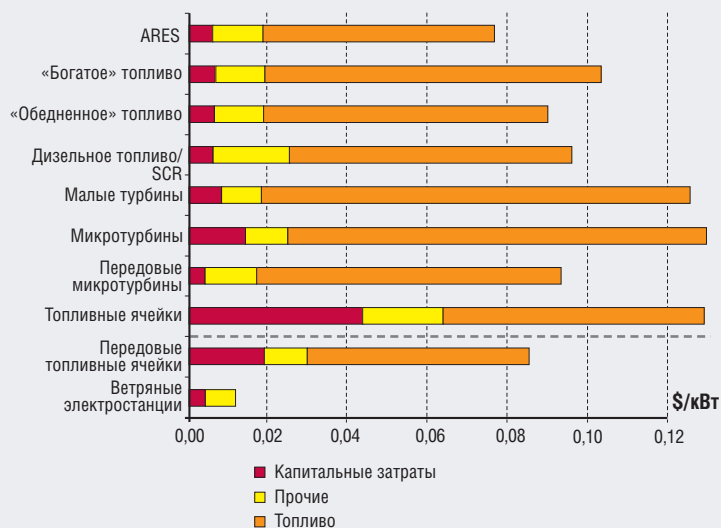


Рис. 6. Стоимость электроэнергии, вырабатываемой различным энергетическим оборудованием

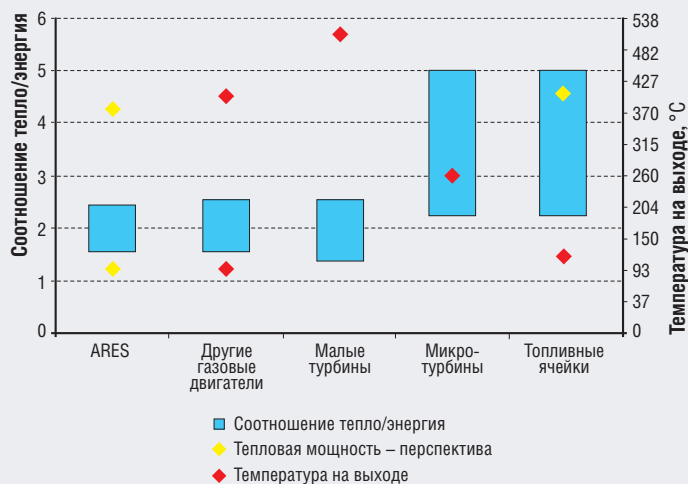


Рис. 7. Параметры когенерационных установок

EEA Associates, Woodward. University of Lund, Hiltner Combustion Systems, Champion Inc., RFA Minnesota, Purdue University, Oak Ridge National Laboratory.

Базовыми выбраны двигатели серии G3500. В качестве стенда для проведения испытаний и отработки технологий компания предоставила муниципальную электростанцию в г. Хебер Сити (штат Юта). Состав основного оборудования станции включает три установки G3520C мощностью 1850 кВт каждая и по две установки G3516C (1500 кВт) и G3516B (750 кВт). Все они были задействованы для отработки тех или иных технологий ARES.

В результате реализации первого этапа программы решены следующие задачи:

- проведен анализ тенденций мирового рынка, чтобы определить наиболее значимые параметры установок для заказчиков, а также востребованный мощностной ряд;
- разработана конструкция турбоагнетателя с целью повышения степени повышения давления в двигателе;
- разработана конструкция одноцилиндрового двигателя для проведения испытаний, а также конструкция многоцилиндрового макета для отработки технологий с последующим применением их на полномасштабных двигателях.
- создана программа для компьютерного моделирования процессов горения и для разработки конструкций компонентов двигателей.

❶ Фото 2. Одноцилиндровый двигатель компании Caterpillar для отработки технологий по программе ARES



- разработана концепция SE-3 (Stoichiometric-ERG-Three way catalyst – стехиометрическое горение-рециркуляция выхлопных газов – трехуровневое внешнее каталитическое подавление выбросов) при использовании предварительно обедненной смеси в качестве топлива.

Основные средства при этом были направлены на разработку концепции SE-3, создание передового турбоагнетателя HEAT™, а также на запуск одноцилиндрового испытательного двигателя (фото 2).

Реализация второго этапа программы ARES предполагает выполнение следующих базовых задач:

- отработка технологий HCCI и развитие SE-3 на макетном многоцилиндровом двигателе, а затем в составе установки. Опытная оценка эксплуатационных параметров системы впрыска топлива и горения на испытательном стенде;
- разработка концепции передовой системы контроля и управления двигателя, а затем и установки в целом;
- окончательная доводка компьютерной модели цикла;
- изготовление полномасштабного двигателя с применением всех разработок, запуск его в опытно-промышленную эксплуатацию и окончательная доводка. Пилотные поставки установок на базе данных двигателей.

Окончание этапа и представление отчета о результатах выполненных работ запланировано на конец 2007 года. К этому времени предполагается получить первоначальные результаты эксплуатации пилотных установок.

На третьем этапе программы планируется окончательная доводка технологий впрыска топлива, систем горения и турбонаддува, внедрение лазерного зажигания на основании результатов опытно-промышленной эксплуатации пилотных установок. Будет проведен глубокий анализ рынка с целью выявления наиболее перспективных сегментов для представления в 2010 году энергетического оборудования, созданного в рамках ARES.

Waukesha

Согласно программе компания модернизирует серию газопоршневых двигателей VGF. В рабочую группу входят Технологический университет Массачусетса и Государственный университет Колорадо, компании Winsert, Borg Warner, NICOR.

На начальном этапе работа была направлена на создание установки в классе мощности 1000 и 1100 кВт, который определен как наиболее перспективный на энергетическом рынке.

Две пилотные установки APG1000 мощностью 1000 кВт установлены в г. Мэнсфилд (штат Огайо) на предприятиях Jay Plastics и Broshco Fabricated Products компании Jay Industries.

APG1000 (фото 3) создана на базе 16-цилиндрового газопоршневого двигателя APG 16V150LTD с турбонаддувом и промежуточным охлаждением. Энергоустановка работает на предварительно обедненной смеси, ее КПД составляет 42,7% при частоте 50 Гц и 40,5% при 60 Гц.

Установки оснащены турбонагнетателями компании ABB Turbocompressors. Система контроля и управления ESM собственной разработки обеспечивает контроль соотношения воздуха и топлива в обедненной смеси, контроль и управление процессом зажигания, скоростью вращения силового вала, диагностику детонации. Она обеспечивает аварийные остановки двигателя, а также постоянную диагностику и мониторинг основных эксплуатационных параметров двигателей.

Во время опытно-промышленной эксплуатации осуществляются испытания и доводка компонентов установок, а также технологий, разработанных и созданных в рамках ARES. В частности, это касается всего цикла использования воздуха – начиная от воздухозабора и заканчивая выхлопной системой. Кроме того, проводятся полномасштабные испытания системы сжигания обедненной смеси для обеспечения стабильности вырабатываемой двигателем энергии и увеличения срока службы компонентов системы.

С использованием компьютерного моделирования разработаны передовые системы головок цилиндров с учетом повышенного давления в самих цилиндрах, оптимизирована система охлаждения. Модернизированы также системы воздухозабора и выхлопа для максимального снижения потерь рабочего тела с целью достижения более высокого КПД установки.

Первые коммерческие поставки APG1000 планируются в этом году. Компания Waukesha продолжает работы в рамках программы по созданию модельного ряда энергетических установок на базе газопоршневых двигателей. В частности, планируется начать опытно-промышленную эксплуатацию установок APG2000 и APG3000 Enginator (мощностью 2100 кВт и 3200 кВт соответственно) на одном из промышленных предприятий штата Огайо в конце 2006 - начале 2007 гг. ■

Редакция продолжит публикацию статей о результатах работы компаний в рамках программы ARES в следующих номерах журнала.

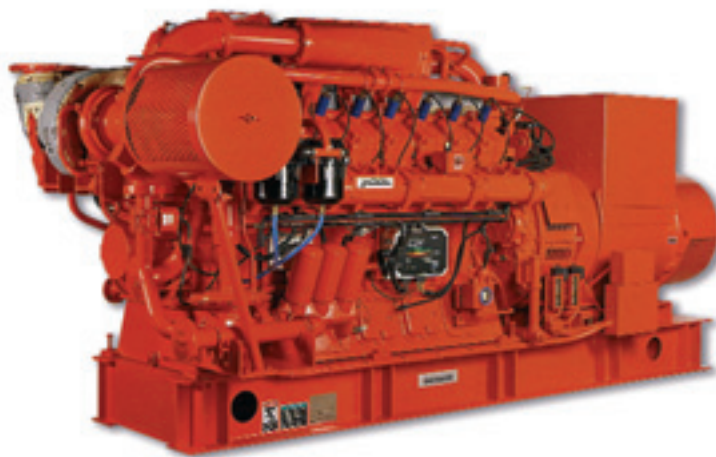


Фото 3. Установка APG1000 на базе газопоршневого двигателя APG 16V150LTD компании Waukesha

Использованная литература

1. Ron Fiskum, US Department of Energy, Advanced Reciprocating Engine Systems (ARES).
2. Raj Sekar, Argonne National Laboratory Report.
3. Mike McMillian, National Energy Technology Laboratory Report.
4. Tim Theiss, Oak Ridge National Laboratory Report.
5. Bryan Willson, Colorado State University, University Activities Report.
6. Avtar Bining, California Energy Commission, Advanced Reciprocating Internal Combustion Engine (ARICE) Program, Press release.
7. David Watson, Waukesha, Advanced ARICE Systems Report.
8. Sreenath Gupta, Argonne National Laboratory, Advanced Laser Ignition Systems (ALIS) Consortium Report.
9. Dan Flowers, Lawrence Livermore National Laboratory, HCCI ARICE System development.
10. Martin Willi, Caterpillar, Lean Burn Combustion Advances.
11. Jim Drees, Waukesha, Stoichiometric Combustion Advances Report.
12. Axel zur Loye, Cummins, Homogeneous Charge Compression Ignition.
13. Tim Callahan, Southwest Research Institute, Future Research Opportunities.
14. Mark McNeely, Diesel & Gas Turbine Worldwide National and International Markets for Reciprocating Engines.
15. US DoE – ARES Fact sheet.
16. Thomas Smith, VP - Energy Operations, Advanced Stationary Reciprocating Engine RD&D: Opportunities for ARES - ARICE Collaboration.