

МЕТОДЫ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ В ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВКАХ

Жубанова Фарида Абдирасулкызы

магистрант, Казахстанско-Британский технический университет, Казахстан, г. Алматы

Дусалиев Каиргали Мукашевич

научный руководитель, проф., д-р. хим. наук, Казахстанско-Британский технический университет, Казахстан, г. Алматы

Аннотация. В 2016 году Казахстан как и большинство стран мира подписал соглашение о “Рамочной конвенции ООН об изменении климата, регулирующее меры по снижению содержания углекислого газа в атмосфере”. Страны участники Парижского соглашения берут на себя обязательство сократить выбросы углекислого газа в атмосферу, а также обязуются удержать рост глобальной средней температуры не более 2 °С относительно прежних показателей доиндустриальной эпохи и «приложить усилия» для ограничения роста температуры величиной 1,5 °С. В рамках данного соглашения Казахстан обязуется к 2030 году сократить выбросы парниковых газов на 15 процентов.

В связи с этим перед государством стоит задача о сокращении выбросов в атмосферу парниковых газов. Одним из методов сокращения углекислого газа является, эффективное использование сжигаемого ископаемого топлива увеличивая КПД. Таким образом увеличивая количество энергии получаемого из ископаемых топлив мы сможем уменьшить потребление, в конечном итоге уменьшая выход углекислого газа. Известно, что газоперекачивающие агрегаты (ГПА) с приводом от газотурбинных установок (ГТУ), установленных на компрессорных станциях (КС) магистральных газопроводов постсоветского пространства является примером не эффективного использования сжигаемого топлива. При этом средневзвешенный КПД ГПА составляет всего 25-29% и это означает, что с выхлопными газами ГТУ теряется более 70% вырабатываемого тепла [2, 3]. При выходе, температура выхлопных газов ГТУ равен 400-500 °С. Такая высокая температура, которая могла бы использоваться для выработки дополнительной энергии теряется в атмосфере. Общая протяженность казахстанских магистральных газопроводов составляет более 19 тысяч километров, на которых работают 56 компрессорных станций, установлено 316 газоперекачивающих агрегата.

Данная работа предусматривает поиск исследований по рекуперации отработанного тепла газовых турбин обсуждаются различные методы отработки тепла выхлопных газов газовых турбин, рассматриваются преимущества и недостатки различных технологий, а также применяемость данных технологий в Казахстане.

ВВЕДЕНИЕ

Газовые турбины сыграли важную роль в промышленном производстве механической энергии благодаря очень высокому соотношению мощности к весу, достигаемому с помощью конфигураций простого цикла, и высокой эффективности преобразования, которая может быть получена в системах, рекуперации тепла выхлопных газов, которая непосредственно указывает на производительность, достижимую с помощью различных методов рекуперации, по сравнению с базовой установкой без рекуперации. Затем представлена инновационная

схема внешней рекуперации тепла: она предусматривает переоснащение существующих парогазовых электростанций за счет закачки пара, производимого дополнительной установкой, состоящей из газовой турбины и парогенератора-утилизатора. Тепло выхлопных газов газовых турбин может быть возвращено извне или внутри самого цикла [1].

Помимо высокой эффективности, парогазовые установки имеют много других преимуществ, в том числе [2]:

- низкие выбросы, так как природный газ не производит золы или SO_x и не выделяет летучих углеводородов, CO и NO_x в меньшем количестве, чем нефть и уголь;
- низкие капитальные затраты и короткие сроки строительства (часто 2–3 года);
- меньшее пространство, чем у эквивалентных угольных или атомных электростанций;
- гибкость в размере установки от 10 до 750 МВт на парогазовую установку;
- быстрый запуск, что позволяет легче реагировать на изменения спроса.

В последние годы наблюдается значительный рост использования электростанций с комбинированным циклом, которые, несмотря на более высокую стоимость топлива по сравнению с обычными паровыми электростанциями, в настоящее время являются лучшим выбором с точки зрения стоимости единицы электроэнергии [3].

1. Конфигурации газовых турбин с внутренней рекуперацией тепла

По сравнению с газовыми турбинами простого цикла более высокие затраты на строительство электростанции с комбинированным циклом не всегда компенсируются более высоким КПД, особенно для малых и средних электростанций. Необходимость сочетать высокую эффективность комбинированных циклов с низкой стоимостью простых циклов вызвала интерес к новым технологиям, позволяющим утилизировать внутреннее отходящее тепло газовой турбины. Внутреннее тепло можно утилизировать через рабочую жидкость (топливо, воздух) или вспомогательную жидкость (обычно воду). В первом случае внутренняя рекуперация тепла определяется как «прямая», во втором - как «косвенная» [4].

Термодинамическая регенерация — это метод прямого внутреннего восстановления, так как тепловая энергия передается непосредственно от выхлопных газов воздуху на выходе из компрессора. Это дает повышение эффективности за счет снижения потребности в первичной тепловой энергии без изменения, в первом приближении, выходной механической мощности. С другой стороны, закачка пара - это метод непрямого внутреннего восстановления. В этом случае рекуперированная тепловая энергия передается вспомогательной жидкости (воде), которая затем вводится в камеру сгорания. Это увеличивает первичную тепловую энергию, необходимую для поддержания постоянной температуры на входе в турбину, но приводит к увеличению мощности и, как следствие, повышению эффективности. Прямое и косвенное восстановление также можно комбинировать, как, например, в циклах HAT и CRGT. В установках с влажным воздухом (HAT) насыщение воздуха на выходе из компрессора увеличивает запас регенерации благодаря большей разнице температур между выхлопным газом на выходе из турбины и сжатым воздухом на входе в регенератор. В установках с химической рекуперацией (CRGT) тепло выхлопных газов рекуперруется посредством эндотермического процесса парового риформинга первичного топлива. Более конкретно, часть рекуперированного тепла передается непосредственно топливу, а оставшаяся часть используется для производства необходимого пара.

Тепло выхлопных газов газовых турбин можно утилизировать внутри, используя традиционные (термодинамическая регенерация, впрыск пара) или нетрадиционные (регенерация влажного воздуха, паровой риформинг топлива). В случае термодинамической регенерации тепло рекуперуется «напрямую», поскольку тепловая энергия передается непосредственно от выхлопного газа, выходящего из турбины, сжатому воздуху на входе в камеру сгорания. Это дает повышение эффективности за счет снижения первичной тепловой энергии без изменения, в первом приближении, механической выходной мощности. В случае

впрыска пара тепло утилизируется «косвенно», тепловая энергия передается вспомогательной текучей среде (воде), которая затем впрыскивается в камеру сгорания, что требует дополнительного топлива для поддержания постоянной температуры газа на входе в турбину. Это приводит к увеличению механической мощности и повышению эффективности. Поскольку последнее зависит от соотношения между увеличением механической мощности и увеличением мощности топлива, на него в основном влияют соотношение пара и воздуха и степень перегрева пара. При заданном соотношении пара и воздуха уменьшение степени перегрева снижает повышение эффективности. В последующем анализе степень перегрева изменяется от максимальной, совместимой с температурой выхлопных газов, до минимальной, соответствующей случаю насыщенного пара. В отличие от прямой рекуперации, тепло выхлопных газов, передаваемое вспомогательной жидкости, не полностью повторно вводится в цикл, поскольку часть его, используемая для испарения воды, теряется с паром в дымовой трубе. Усовершенствованные нетрадиционные методы, такие как регенерация влажного воздуха и паровой риформинг, могут улучшить возможности регенерации, поскольку они сочетают в себе эффекты прямого и косвенного восстановления. В установках с влажным воздухом насыщение сжатым воздухом перед входом на холодную сторону регенератора позволяет увеличить запас регенерации: часть рекуперированного тепла передается непосредственно сжатому воздуху, а остальная часть используется для испарения воды внутри сатуратора. В установках с химической рекуперацией тепло выхлопных газов рекуперировано посредством эндотермического процесса парового риформинга первичного топлива: часть извлеченного тепла передается непосредственно топливу, причем процесс риформинга является своего рода «химической регенерацией», в то время как остаток используется для производства необходимого пара. Как для традиционных, так и для нетрадиционных технологий внутренняя рекуперация тепла влияет на производительность газотурбинной установки двумя способами: изменяя первичную тепловую энергию, подаваемую извне, и увеличивая мощность, производимую вспомогательной жидкостью, если она присутствует.

2. Рекуперация газа

Рекуперация выхлопных газов использовалась в сочетании с промышленными газовыми турбинами более 50 лет, но всегда были основные металлургические проблемы из-за температуры теплообменника. Увеличение степени сжатия увеличивает температуру на выходе компрессора, но снижает температуру выхлопных газов, и в современных конструкциях газовых турбин легко достигаются предельные условия для передачи тепла от выхлопного потока. Промежуточное охлаждение снижает проблему теплопередачи и позволяет рекуперацию с помощью высокоэффективных турбин.

Блок имеет выходную мощность около 20 МВт и тепловой КПД около 42% [5]. Некоторые современные конструкции с простым циклом могут соответствовать этой эффективности, но WR21 имеет превосходные характеристики регулирования. Существует мнение, которое теоретически хорошо подтверждается, что регенератор обеспечит более эффективный цикл, чем рекуператор. Это связано с очень высокой тепловой эффективностью регенераторов; возможны значения около 95%. Однако максимальная эффективность достигается при очень низких отношениях давлений, обычно менее 5 [6]. Следовательно, даже если бы теоретические характеристики могли быть достигнуты, потребовались бы относительно большие турбины. Создатель регенерированного цикла, по-видимому, осознал, что в обозримом будущем он будет применяться для двигателей с очень малой мощностью.

3. Впрыск пара

Система будет работать, если давление пара выше, чем на выходе из компрессора, и даже для машин с самым высоким коэффициентом давления потребуются температура насыщенного пара ниже 200 °С. Таким образом, впрыск пара преодолевает фундаментальное ограничение теплопередачи, связанное с рекуперацией газа в газ.

Газовая турбина GE LM5000 - одна из самых известных конструкций с нагнетанием пара. В стандартном промышленном варианте этот двигатель вырабатывает мощность около 30 МВт с тепловым КПД 36%. Закачка пара увеличивает выходную мощность до 42 МВт и КПД почти на шесть процентных пунктов [7]. Анализы, основанные на конструкции ABB GT10, показывают,

что тепловой КПД составляет около 44% при аналогичной выходной мощности [8]. Впрыск пара также улучшает удельную мощность; анализ АBB GT10 предсказывает увеличение примерно на 40% по сравнению с простым циклом. Некоторые производители производят турбины с впрыском пара с выходной мощностью до 0,5 МВт, и были рассмотрены варианты конструкции, включая промежуточное охлаждение и повторный нагрев. Практическая проблема с закачкой пара — это потребление воды, так как системы с полными потерями кажутся нормальным устройством. Потребление обычно составляет от 1,1 до 1,6 кг воды высокой чистоты на 1 кВт · ч электроэнергии. Необходимая система очистки воды для крупномасштабной установки будет составлять около 5% от общих капитальных затрат, а эксплуатационные расходы добавят около 5% к стоимости топлива. Кроме того, из выхлопной трубы могут образовываться значительные паровые шлейфы. Эта проблема решена. Например, крупная газораспределительная компания в Канаде признала преимущества турбин с впрыском пара для компрессоров и утверждает, что разработала экономичную систему рекуперации воды [9]. Однако в схеме использовалась турбина GE LM2500 с относительно небольшой мощностью. Поскольку в современных конструкциях температура впрыскиваемого пара должна быть повышена в камере сгорания газовой турбины примерно до 1250 ° С, есть преимущества в близком приближении температуры в котле-утилизаторе. Однако, поскольку кипение - это процесс с постоянной температурой, высокие температуры пара обязательно связаны с низким уровнем рекуперации тепла. И наоборот, температура пара должна быть относительно низкой, чтобы рекуперация тепла из выхлопного потока была максимальной. Эта сложность ограничивает максимальную теоретическую эффективность всей системы. На практике вариант с высокой температурой обычно является лучшим компромиссом.

4. Циклы испарения

Ограничения котла-утилизатора могут быть уменьшены с помощью систем с несколькими давлениями, так что последующие температуры насыщения будут более точно согласованы с температурами выхлопных газов с лучшим приближением к обратимому процессу. Однако системы впрыска пара не могут поддерживать потоки пара при различных давлениях без существенных конструктивных "изгибов". Были предложены схемы [10], но они вряд ли будут реализованы на практике. Циклы испарения преодолевают проблему ограничения котла за счет впрыска жидкой воды в воздушный поток газовой турбины на выходе из компрессора. В действительности, теплота сжатия используется для испарения воды и в результате фазовая смесь нагревается выхлопными газами турбины в подходящем теплообменнике. Преимущества те же, что и при впрыске пара, то есть большой массовый поток через турбину и повышенная удельная теплоемкость рабочей жидкости. Температура однофазной смеси может "отслеживать" температуру выхлопных газов, следовательно, возможна гораздо меньшая разница температур между потоками. На основе анализа это действительно приводит к повышению эффективности; разные источники указывают, что эффективность будет в диапазоне 45-46%. Однако прогнозируется, что удельная производительность будет более чем на 20% ниже, чем у основного цикла впрыска пара. Вероятно, самый известный из циклов испарения называется турбина влажного воздуха или интегрированная газовая турбина влажного воздуха, поскольку она была разработана специально для работы в сочетании с установкой газификации угля. Основной принцип такой же, как описано ранее, но регенерация тепла от угольного газогенератора является важной дополнительной функцией. Газ, производимый специалистами по газу, обычно должен охлаждаться как часть процесса удаления серы, а некоторые процессы отбрасывают значительные количества низкопотенциального тепла в потоках охлаждающей воды. Эффективное использование этих источников тепла способствует общей эффективности предприятия. В конструкции "отходящее" тепло газового двигателя используется для предварительного нагрева воды перед ее впрыском в воздушный поток газовой турбины [11]. Прогнозы относительно общей эффективности системы (газовая горелка плюс турбина) варьируются от 39% до 42%. Потребление воды является проблемой по тем же причинам, что и для циклов нагнетания пара, но уровень потребления составляет лишь около одной трети.

5. Химическая рекуперация

Как отмечалось в предыдущих разделах, в выхлопных газах циклов впрыска пара и влажного воздуха высокое содержание воды. Следовательно, значительная часть тепла,

рекуперированного из выхлопного потока, в конечном итоге отводится в атмосферу в виде скрытого тепла. Как отмечалось ранее, схемы рекуперации воды, которые, очевидно, также привели бы к рекуперации скрытой теплоты, были предложены, но не реализованы. Таким образом, для практических систем скрытая теплота выхлопных газов устанавливает предел производительности. Химическая рекуперация - это схема, которая преодолела бы эту трудность, по существу, используя тепло выхлопных газов для производства собственного богатого водородом топлива из метанового сырья. Основные характеристики предлагаемого цикла показаны на рис. 4. Топливо производится в установке парового риформинга с использованием рекуперативного тепла от переохлажденной, повторно нагретой турбины с некоторым впрыском пара. Впрыск пара используется в основном для охлаждения, а секция повторного нагрева турбины предназначена для улучшения процесса преобразования. Был проведен некоторый анализ, позволяющий предположить, что более простая система без промежуточного охлаждения и повторного нагрева была бы более конкурентоспособной с коммерческой точки зрения. Химическая рекуперация - сложная система, но она была предметом существенного технико-экономического обоснования со стороны крупных промышленных организаций благодаря поддержке Калифорнийской энергетической комиссии [12]. По оценкам, эффективность более сложного цикла составляет около 60%, и полученные выгоды от снижения загрязнения были основными причинами интереса к системе. В этом отношении очень важно производство и использование топлива, богатого водородом. Его можно сжигать при более низкой температуре, чем метан, и, следовательно, процесс горения имеет меньшую склонность к образованию оксидов азота.

ВЫВОДЫ

Были исследованы различные методы внутренней или внешней рекуперации тепла выхлопных газов газовых турбин. Методы внутренней рекуперации тепла могут быть традиционными (регенерация, нагнетание пара) или нетрадиционными (регенерация влажного воздуха, паровой риформинг), в то время как внешняя рекуперация тепла может выполняться с использованием пара-нижнего цикла (комбинированный цикл). Чтобы сравнить возможности различных решений, была введена характеристическая плоскость рекуперации тепла выхлопных газов, основанная на едином подходе анализа. Уровень эффективности рекуперации тепла выхлопных газов - эффективный инструмент для сравнения различных конструктивных решений, которые концептуально различны и не сопоставимы напрямую. На этом уровне каждый метод извлечения идентифицируется областью, положение и протяженность которой зависит от типичных параметров и характеристик базовой газовой турбины, а также от ограничений, связанных с минимальной температурой выхлопных газов и увеличением максимального массового расхода в турбине.

Список литературы:

1. Roberto Carapellucci and Lorena Giordano (2012). The Recovery of Exhaust Heat from Gas Turbines, Efficiency, Performance and Robustness of Gas Turbines
2. C.F. McDonald, D.G. Wilson, The Utilization of Recuperated and Regenerated Engine Cycles for High-Efficiency Gas Turbines in the 21st Century, Applied Thermal Energy 16 (8/9) (1996) 635-654.
3. T. Heppenstall. Advanced gas turbine cycles for power generation: a critical review / Applied Thermal Engineering 18 (1998) 837-846
4. T. V. Nguyen, L. Tock, P. Breuhaus, F. Maréchal, and B. Elmegaard, "Oil and gas platforms with steam bottoming cycles: System integration and thermoenviromomic evaluation," Appl. Energy, vol. 131, pp. 222-237, 2014.
5. Hossein Nami, Ivar S. Ertesvåg, Roberto Agromayor, Luca Riboldi, Lars O. Nord, Gas turbine exhaust gas heat recovery by organic Rankine cycles (ORC) for offshore combined heat and power applications - energy and exergy analysis, Energy (2018)
6. Kuroki H, Hatamiya S, Shibata T, Koganezawa T, Kizuka N, Marushima S, Development of

elemental technologies for advanced moist air turbine system, J. Eng. Gas Turbines Power, Volume 130, Issue 3 (2008).

7. Walsh P.P. , Fletcher P., Gas Turbine Performance, ASME Press, 2004

8. R.W. Smith et al., Kalina Combined Cycle Performance and Operability, PWR Vol. 30, Joint Power Generation Conf. Vol. 2 (ASME) (1996).

9. Carapellucci R. A unified approach to assess performance of different techniques for recovering exhaust heat from gas turbines. Energy Convers Manage 2009;50(5):1218-26.

10. Masaru Hirata, Development of high temperature gas turbine---steam turbine combined cycle plant for community cogenerating energy system, American Chemical Society, 799438, pp. 2039-2044 (1979).

11. Ahmed BOUBENIA, Ahmed HAFIFA, Abdellah KOUZOU, Kamal MOHAMMEDI, Mohamed BECHERIF / Petroleum (2016)

12. Jonsson M, Yan J, Humified gas turbines - a review of proposed and implemented cycles, Energy, Volume 30, Issue 7 (2005) 1013-1078.