

УДК 62-176.2

Утилизация теплоты уходящих газов

Д. Д. Русаков

*Студент, кафедра «Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки»
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия*

*Научный руководитель: И. Г. Суровцев, к. т. н.,
доцент кафедры «Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки»
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия*

МГТУ им. Н.Э. Баумана
SATURNrussia@rambler.ru

ВВЕДЕНИЕ

Теплота уходящих (дымовых) газов в промышленности является потенциальным энергоресурсом, который в настоящее время практически не используется. Энергетика является одним из основных факторов в сегодняшней глобальной экономике. Получение дополнительной прибыли за счет утилизации уходящего тепла (продажа электроэнергии), снижение вредного воздействия на окружающую среду являются ключевыми вопросами, которые интересуют современные промышленные компании.

Есть технологии, позволяющие использовать эту теплоту для выработки электроэнергии. Такие технологии технически осуществимы и экономически целесообразны, использование этих технологий не требует изменения технологических процессов производства. Утилизация уходящей теплоты возможна на энергетических станциях, металлургических и химических заводах, нефтедобывающих скважинах, газоперекачивающих компрессорных станциях, на судах (кораблях) и платформах (рыболовецких, нефтегазодобывающих).

В данной работе рассматриваются две технологии утилизации теплоты уходящих (дымовых) газов: органический цикл Ренкина (ОЦР) и сверхкритический

углекислотный цикл Брайтона. Многие современные компании занимаются разработкой и реализацией таких установок, например, компании ORMAT (США- Израиль), GeneralElectric(США), Pratt & Whitney (США) и т.д. В качестве источника теплоты уходящих газов будем рассматривать газотурбинную установку (ГТУ).

ОРГАНИЧЕСКИЙ ЦИКЛ РЕНКИНА

Схема установки, реализующей ОЦР, изображена на рис. 1. Для передачи теплоты уходящих газов ГТУ используется промежуточный контур, теплоносителем в котором служит диатермическое масло. Нагретое масло нагревает и испаряет органическое рабочее тело, обычно соединения углеводородов, например, пентан, которое совершает работу в турбине. Турбина приводит в движение электрогенератор, вырабатывающий электрическую энергию.

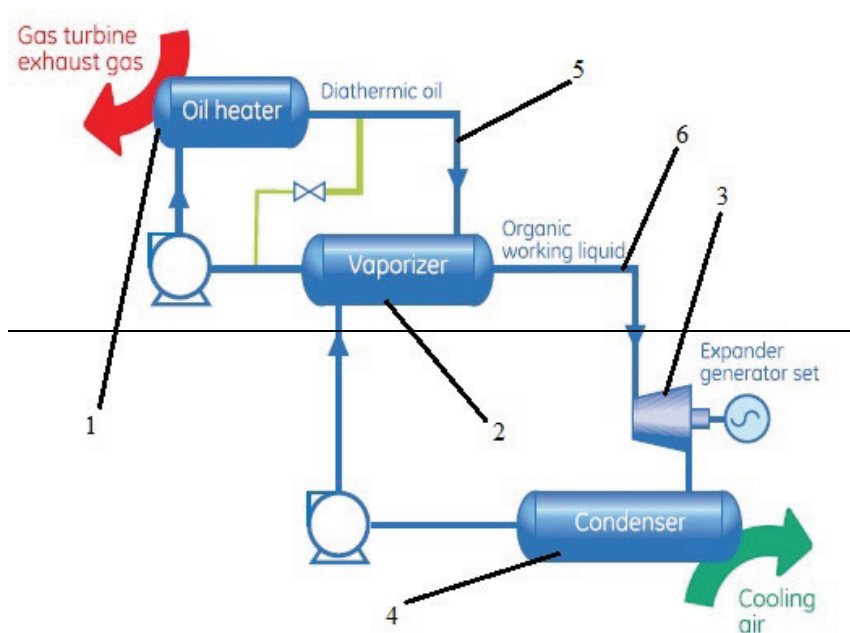


Рис. 1. Пример установки, реализующей ОЦР [1]:

- 1– нагреватель для диатермического масла уходящими газами ГТУ;
- 2– испаритель; 3– турбина с электрогенератором; 4– конденсатор;
- 5– контур диатермического масла; 6– контур рабочего тела

Термодинамический цикл и основные узлы установки, реализующей ОЦР представлены на рис. 2.

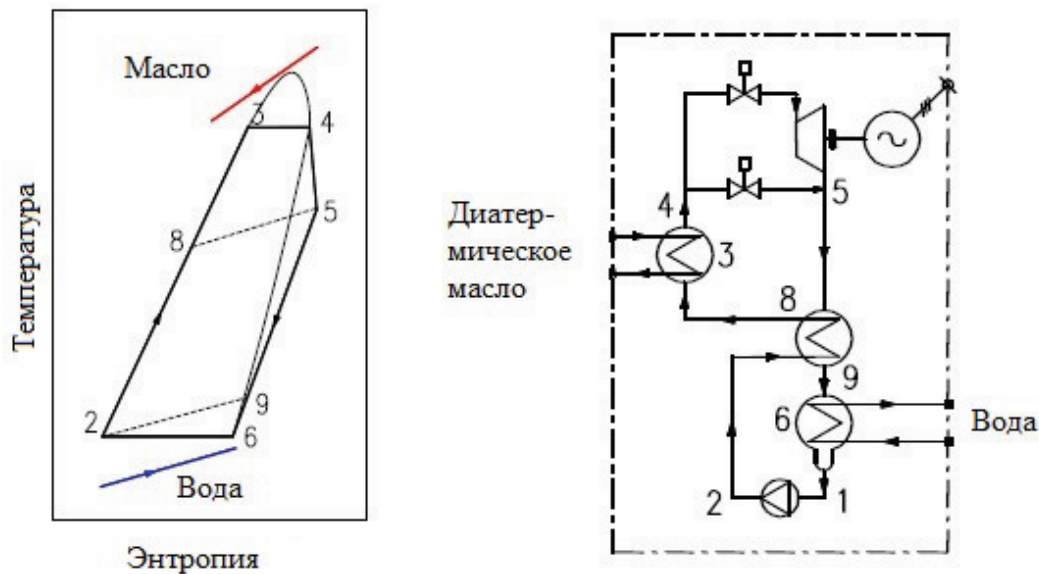


Рис. 2. Цикл и схема установки, работающей по циклу Ренкина [2], (обозначения см. в тексте).

Установка работает следующим образом. Нагретое диатермическое масло используется для предварительного нагрева и испарения органического рабочего тела (процесс 8-3-4). Рабочее тело в парообразном состоянии поступает в турбину, которая приводит в движение электрогенератор (процесс 4-5). Затем пары рабочего тела проходит через регенератор (процесс 5-9), где отдают тепло жидкости перед ее поступлением в нагреватель (испаритель) 3, (процесс 2-8). Наконец, пары рабочего тела конденсируются в водяном (или воздушном) конденсаторе (процесс 9-6-1). Рабочее тело в жидком состоянии сжимается насосом до необходимого давления (процесс 1-2) и поступает в регенератор, а затем в испаритель. Термодинамический цикл замыкается.

Рассмотрим цикл установки, реализующей ОЦР, с параметрами приведенными в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные для установки, реализующей ОЦР

Параметр	Значение
Расход уходящих газов из ГТУ, кг/с	5...100
Температура уходящих газов при входе в теплообменный аппарат "уходящие газы– диатермическое масло", К	773, 793, 843
Температура уходящих газов при выходе из теплообменного аппарата "уходящие газы– диатермическое масло", К	380
Температура диатермического масла при входе в испаритель, К	573, 588, 623

Температура диатермического масла при выходе из испарителя, К	354
Давление органического рабочего тела при входе в турбину, МПа	3,0
Температура органического рабочего тела при входе в турбину, К	462

В результате расчета по методике [4] была получена зависимость между вырабатываемой электрической мощностью установки, реализующей ОЦР, и расходом уходящих газов из ГТУ, приведенная на рисунке 3.

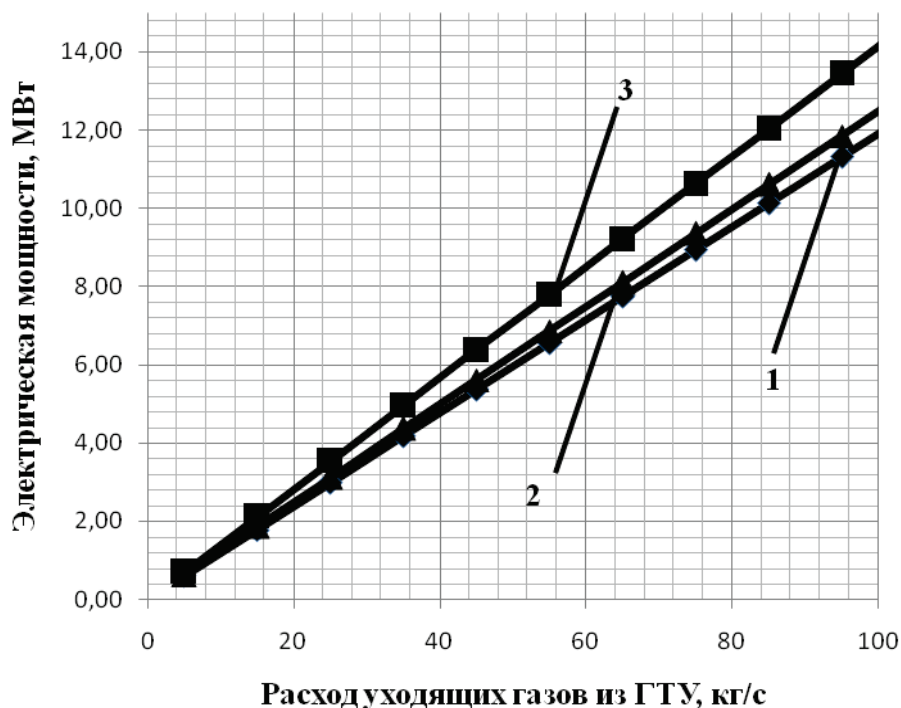


Рис.3. Зависимость вырабатываемой электрической мощности ОЦР установки от расхода уходящих газов из ГТУ для разных температур входа уходящих газов в теплообменный аппарат "диатермическое масло– уходящие газы":

1– 773 К; 2– 793 К; 3– 843 К

Из графика (рис. 3) следует, что с увеличением температуры уходящих газов увеличивается количество теплоты, отбираемое у уходящих газов, что ведет к увеличению выработки электрической мощности установкой. Электрическая мощность растет также с увеличением расхода уходящих газов из ГТУ, то есть с увеличением подведенной теплоты в цикле. Однако, увеличение расхода уходящих газов из ГТУ ведет к увеличению расхода диатермического масла, расхода органического рабочего тела, следовательно, и к увеличению габаритов узлов установки.

Значение электрической энергии, отдаваемой потребителю, будет значительно меньше (на 25-35 %), чем количество энергии, вырабатываемой генератором. Различие

связано с отбором электрической мощности на собственные нужды: для работы циркуляционного масляного насоса, для работы циркуляционного главного насоса (для органического рабочего тела), для работы насоса или вентилятора конденсатора.

Электрический КПД (отношение вырабатываемой электрической мощности к теплоте, сообщенной установке уходящими газами) установки составляет около 23 %, а электрический КПД с учетом собственных нужд оказывается равным 15-17 %.

СВЕРХКРИТИЧЕСКИЙ УГЛЕКИСЛОТНЫЙ ЦИКЛ БРАЙТОНА

Для утилизации теплоты уходящих газов из ГТУ и выработки электрической энергии также можно использовать замкнутую газотурбинную установку, работающую по сверхкритическому углекислотному циклу Брайтона.

Рассмотрим схему установки, приведенную на рисунке 4 [3].

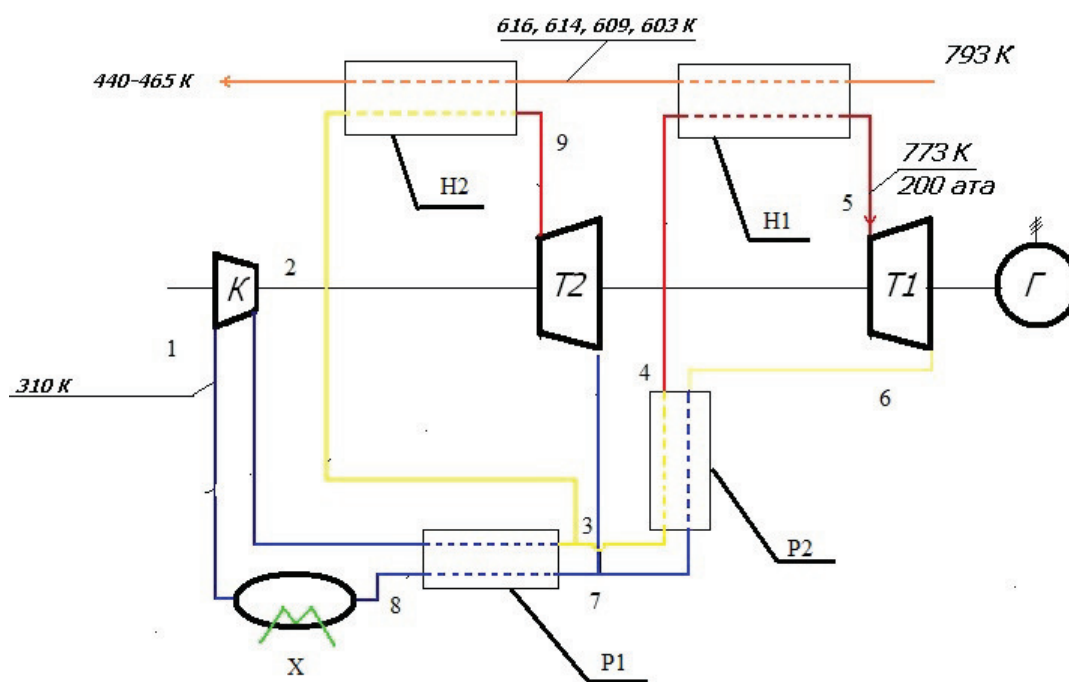


Рис. 4. Замкнутая углекислотная газотурбинная установка [3]

Рабочее тело (углекислый газ) сжимается компрессором (процесс 1-2), затем поступает в регенератор, где нагревается (процесс 2-3) за счет теплоты рабочего тела после турбины. После регенератора P1, происходит разделение рабочего тела на два потока. Первый попадает в регенератор P2 (процесс 3-4), где происходит его дальнейший нагрев за счет теплоты рабочего тела после турбины. Далее первый поток поступает в

нагреватель Н1 (процесс 4-5), где рабочее тело нагревается за счет теплоты уходящих газов из ГТУ. В турбине Т1 углекислый газ совершает работу (процесс 5-6). Затем рабочее тело поступает в регенератор Р2 (процесс 6-7), после которого потоки рабочего тела соединяются (точка 7). Второй поток рабочего тела после регенератора Р1 поступает в нагреватель Н2 (процесс 3-9), затем в турбине Т2 совершает работу (процесс 9-7). После соединения потоков в точке 7, углекислый газ поступает в регенератор Р1, а затем в холодильник (процесс 7-8-1), где он охлаждается до необходимой температуры, и поступает в компрессор. Цикл замыкается.

Рассмотрим цикл установки, изображенной на рис. 4, с параметрами приведенными в таблице 2.

Таблица 2

Исходные данные для углекислотной установки

Параметр	Значение
Расход уходящих газов из ГТУ, кг/с	5...100
Температура уходящих газов при входе в нагреватель Н1, К	773, 793, 843
Температура углекислого газа при входе в турбину Т1, К	753, 773, 823
Давление углекислого газа при выходе из компрессора, МПа	20
Температура углекислого газа при входе в компрессор, К	310
Давление углекислого газа при входе в компрессор, МПа	8,0

В результате расчета по методике [5] были получены зависимости между вырабатываемой электрической мощностью и расходом уходящих газов из ГТУ для различных температур входа уходящих газов в нагреватель Н1, представленная на рис. 5.

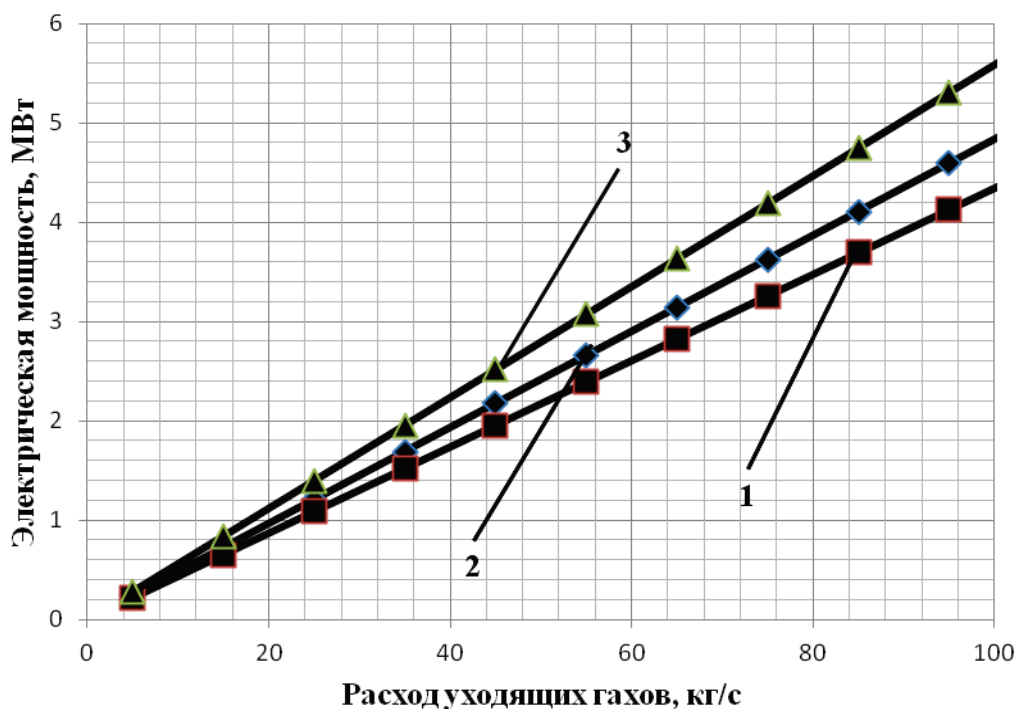


Рис. 5. Зависимость электрической мощности от расхода для разных температур входа уходящих газов в нагреватель Н1:

1– 773 К; 2– 793 К; 3– 843 К

Как видно из рис. 5, с увеличением температуры уходящих газов при входе в нагреватель увеличивается и количество вырабатываемой электрической энергии. Это связано с увеличением количества тепла, отбираемого у уходящих газов.

Электрический КПД установки составляет около 13 %.

ВЫВОДЫ

При сравнение результатов для ОЦР установки (Рис. 3) и углекислотной установки (Рис. 5) можно сформулировать следующие выводы.

Установки позволяют использовать теплоту уходящих газов в определенном интервале температур: углекислотная установка не позволяет использовать тепло уходящих газов ниже 440 К (связано с массогабаритными показателями нагревателя Н2), ОЦР установка имеет ограничение на максимальную температуру из-за свойств диатермического масла. Из-за высоких давлений (20 МПа и 8 МПа) в контуре углекислотные установки позволяют получить меньшие размеры, чем у ОЦР установок. У ОЦР установок давления в контуре ниже (3 МПа и 0,1 МПа), следовательно, большие размеры узлов (большие объемные расходы).

Коэффициенты полезного действия (электрический КПД) у углекислотной и ОЦР установок не велики. При наличии источника тепла такого, как уходящие (дымовые) газы

из ГТУ, выбрасывающиеся в атмосферу при температуре около 773 К, основную роль играет получаемая мощность, а не коэффициент полезного действия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Утилизация уходящих газов из ГТУ является перспективным направлением для исследования и широкого внедрения таких установок на производствах. Установки позволят вырабатывать, на примере компаний Pratt & WhitneyOrmat, около 2-7 МВт электрической мощности и снизят "вредное" воздействие уходящих газов на экологию.

Работа выполнена при финансовом содействии Министерства Образования Российской Федерации.

Список литературы

1. General Electric. OREGEN-2010 new casing. Brochure. Italy, 2010.
2. Recovered energy generation using an organic Rankine cycle system /N. P. Leslie, O. Zimron, R. S. Sweetser, T. K. Stovall // CH-09-024. pages 220-230.
3. Суровцев И. Г., Арбеков А. Н. Применение сверхкритических углекислотных циклов в установках по утилизации промышленной теплоты// Наука и образование. 2013. №2. URL.<http://technomag.edu.ru/doc/533901.html>.
4. Моляков В.Д., Тумашев Р.З. Обоснование схем и параметров высокоэффективных паротурбинных установок для малой энергетики – Известия ВУЗов, Машиностроение, 2012, № 10, с. 52–58.
5. Михальцев В. Е., Моляков В. Д. Расчет цикла газотурбинной установки: Учеб. Пособие/ Под ред. И. Г. Суровцева – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000 – 32с., ил.