

УДК 621.438

**Утилизация теплоты выхлопных газов на газоперекачивающих станциях
газотурбинными установками открытого цикла**

С.С. Михеев

Студент, кафедры «Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки» МГТУ им.

Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

Научный руководитель: Тумашев Р.З., к. т. н., доцент кафедры «Газотурбинные и

нетрадиционные энергоустановки» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

МГТУ им. Н.Э. Баумана

sergeymikheev90@yandex.ru

ВВЕДЕНИЕ

Газоперекачивающие станции магистральных газопроводов России используют газотурбинные двигатели для привода нагнетателей природного газа. Выхлопные газы двигателей имеют температуру 400-570 °С, незначительная часть этой теплоты используется для обогрева элементов газоперекачивающего агрегата и в противообледенительной системе, остальное выбрасывается в атмосферу.

Существуют различные способы утилизации теплоты выхлопных газов газотурбинных двигателей для выработки электроэнергии: в паротурбинных установках с котлом утилизатором, в установках с использованием органического цикла Ренкина и т.д. Альтернативным решением может быть использование утилизационной газотурбинной установки открытого цикла.

Описание схемы утилизационной установки и постановка задачи

Принципиальная схема утилизационной газотурбинной установки открытого цикла представлена на рис. 1.

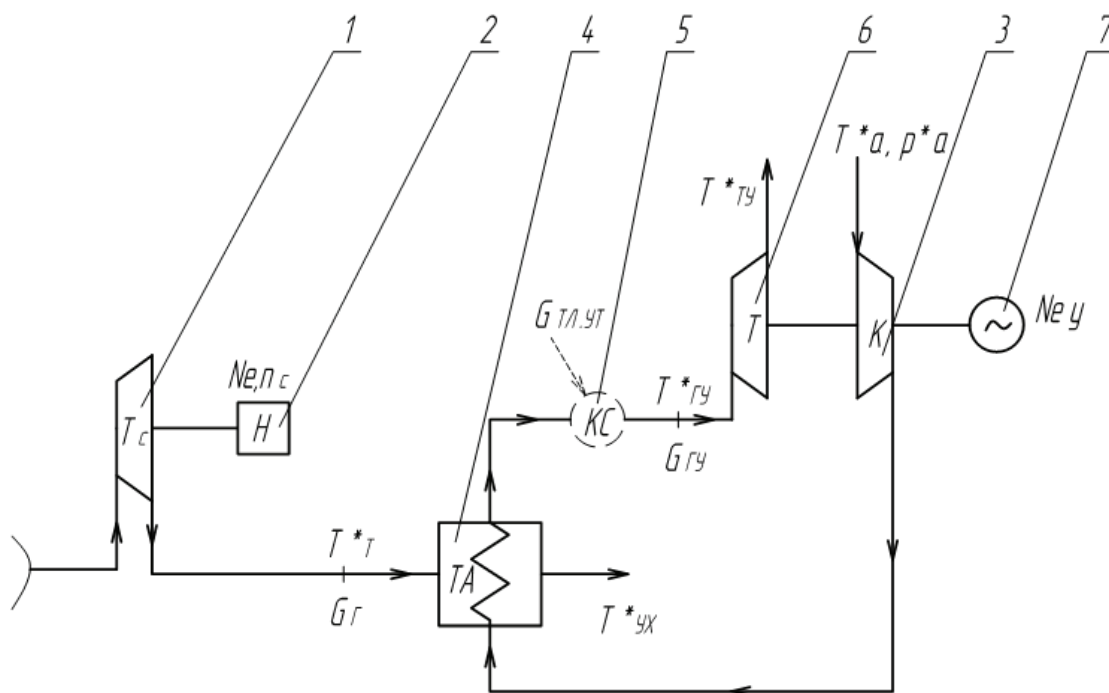


Рис. 1. Принципиальная схема утилизационной газотурбинной установки открытого цикла: 1–силовая турбина базового газотурбинного двигателя; 2–нагнетатель природного газа; 3–компрессор; 4–рекуперативный теплообменник; 5–камера сгорания (ее может и не быть); 6–турбина; 7–генератор

Установка работает следующим образом: компрессор 3 утилизационной газотурбинной установки сжимает воздух, и подает его в рекуперативный теплообменник, в котором он нагревается теплом выхлопных газов базового газотурбинного двигателя (на схеме изображена часть базового газотурбинного двигателя: силовая турбина 1, приводящая нагнетатель природного газа 2). Далее подогретый воздух поступает в камеру сгорания 5, которая может отсутствовать. Камера сгорания применяется для увеличения, в случае необходимости, мощности на клеммах генератора и расширения возможности регулирования мощности утилизационной установки. После камеры сгорания горячий газ (или воздух, если камера сгорания 5 отсутствует) расширяется в турбине 6, которая приводит компрессор 3 и электрогенератор 7, и выбрасывается в окружающую среду.

Термодинамический цикл (цикл Брайтона) утилизационной газотурбинной установки в координатах T – S представлен на рис. 2.

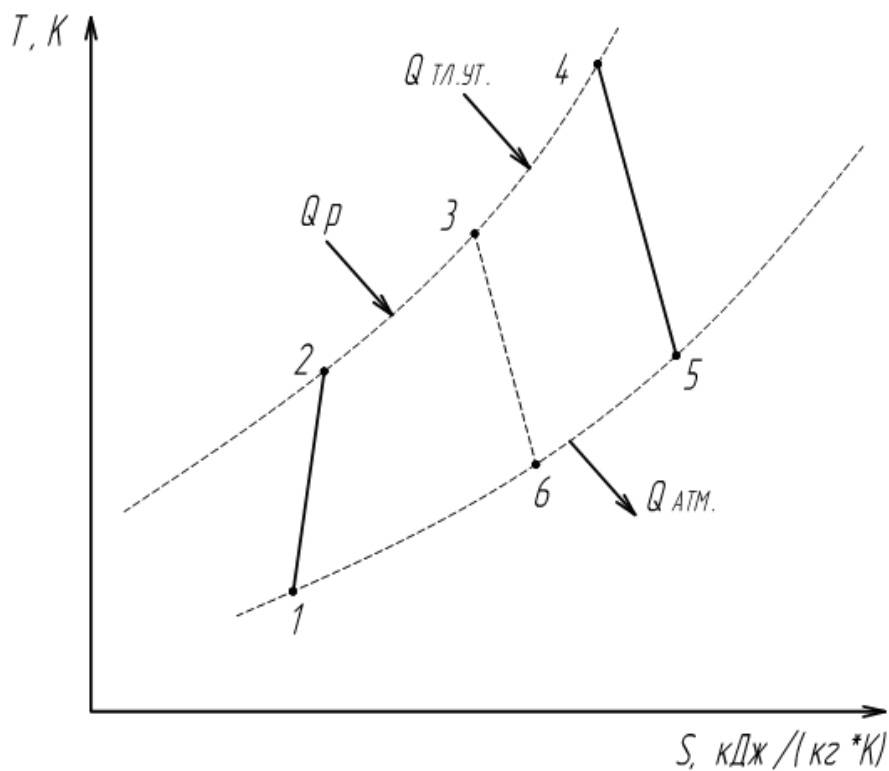


Рис. 2. Термодинамический цикл утилизационной газотурбинной установки открытого цикла: 1-2 – процесс сжатия воздуха в компрессоре; 2-3 – процесс нагрева воздуха в рекуперативном теплообменнике (Q_p – подведенная в процессе теплота); 3-6 – процесс расширения воздуха в турбине, если камера сгорания отсутствует; 6-1 – процесс отвода теплоты в окружающую среду ($Q_{атм.}$ – теплота, выброшенная в атмосферу с выхлопными газами); 3-4 – процесс горения в камере сгорания ($Q_{тл.ут.}$ – теплота, подведенная к рабочему телу в камере сгорания); 4-5 – процесс расширения продуктов сгорания в турбине; 5-1 – процесс отвода теплоты в окружающую среду

Базовый газотурбинный двигатель вместе с утилизационной установкой будем называть газо-газовой комбинированной установкой.

Расчет проведем по методике, изложенной в [1].

При расчете лопаточный КПД турбины принят равным 93 %, политропический КПД компрессора 89 %, механический КПД при отнесении потерь к мощности турбины 99%, утечки через уплотнения 0,5 %. Расход воздуха на охлаждение турбины отсутствует (турбина выполняется неохлаждаемой) из-за низкой температуры рабочего тела. Степень рекуперации в теплообменнике принимаем равной 0,8; коэффициент сохранения полного

давления по холодной стороне теплообменника – 0,97. КПД генератора – 98,5 %. Топливо для базового двигателя и утилизационной установки – природный газ.

Для анализа эффективности утилизационных установок в качестве базовых газотурбинных двигателей были взяты НК-36СТ, ГТУ-16П, ГТД-6,3РМ, характеристики которых приведены в таблице 1 (N_e – мощность двигателя, $\eta_{eГТД}$ – КПД двигателя, π_K^* – степень повышения давления в двигателе, G_g – расход воздуха на входе в компрессор, T_g – температура газа, T_t – температура газа за силовой турбиной).

Таблица 1

Характеристики базовых газотурбинных двигателей

Двигатель	N_e , МВт	$\eta_{eГТД}$, %	π_K^*	G_g , кг/с	T_g/T_t , К
НК36-СТ	25	36	23,1	101,3	1454/730
ГТУ-16П	16,47	37	19,61	57,2	1416/739
ГТД-6,3РМ	6,46	32,58	11,28	21,73	1454/834

Анализ полученных результатов

Проведен анализ с точки зрения получения максимального КПД (найжены оптимальные степени повышения давления в компрессоре). При отсутствии камеры сгорания, оптимум по КПД совпадает с оптимумом по мощности установки. Пример результатов расчета цикла утилизационной газотурбинной установки с базовым двигателем НК36-СТ приведен в таблице 2.

Таблица 2

Результаты расчета цикла утилизационной газотурбинной установки (базовый двигатель НК36-СТ) без камеры сгорания и при оптимальной степени повышения давления в компрессоре

Параметр	Размерность	Значение
Степень повышения давления в компрессоре	-	3
Температура за компрессором	К	409,6
Удельная работа компрессора	кДж/кг	122,5
Расход газа через компрессор	кг/с	114,8

Теплота, подводимая к рабочему телу в теплообменнике	МДж	29,31
Температура воздуха после теплообменника	К	666
Удельная работа турбины	кДж/кг	162
Температура газа после турбины	К	511,5
Мощность утилизационной установки	МВт	4,4
Суммарная мощность газо-газовой комбинированной установки	МВт	29,4
КПД комбинированной установки	%	42,3

Как видно из таблицы 2, дополнительно вырабатывается на валу турбины 4,4 МВт мощности, при этом КПД возрастает с 36 % у базового двигателя до 42,3 % у комбинированной установки. Компрессор и турбина установки получают с малым числом ступеней из-за незначительной степени повышения давления в компрессоре. КПД утилизационных установок с котлом-утилизатором и паровой турбиной и установок, работающих по органическому циклу Ренкина выше. Например, как показываю расчеты для двигателя НК36-СТ, КПД комбинированной установки, использующий органический цикл Ренкина на пентане, составляет около 46 %. КПД комбинированной установки с котлом-утилизатором и паровой турбиной примерно 46,5 %. Рассматриваемого вариант утилизационной газотурбинной установки, несмотря на более низкий КПД, имеет ряд преимуществ:

- Масса рекуперативного теплообменного аппарата меньше чем парового котла (испарителя) и конденсатора. Часто отсутствует источник воды для охлаждения пара в конденсаторе, а конденсаторы воздушного охлаждения имеют большие размеры, и потребляют электрическую энергию для привода вентиляторов. Помимо этого, воздушные конденсаторы требуют защиту от обледенения в зимнее время года.

- Рабочим телом является воздух. В то время как для установки с котлом-утилизатором и паровой турбиной необходима дорогостоящая система водоподготовки. В установках на органическом цикле Ренкина используется пентан, взрывоопасное вещество, требующее повышенных мер пожарной безопасности.

Выработанную генератором утилизационной установки электроэнергию можно отправить по линиям электропередачи потребителю, но так как газоперекачивающие станции в России находятся обычно на большом удалении от населенных пунктов, это может оказаться нерентабельным. Поэтому имеет смысл использовать выработанную электроэнергию для привода электродвигателей, приводящих нагнетатели природного

газа. Рассмотрим НК-36СТ, приводящий нагнетатель мощностью 25 МВт. Чтобы увеличить мощность, вырабатываемую утилизационными установками и уменьшить тем самым их количество для привода одного нагнетателя, а также иметь возможность их регулирования изменением температуры газа перед турбиной, предусмотрены камеры сгорания. На рис. 3 и 4 представлены графики изменения мощности утилизационной установки (базовый двигатель НК36-СТ) и КПД комбинированной установки в зависимости от степени повышения давления в компрессоре и температуры газа после камеры сгорания.

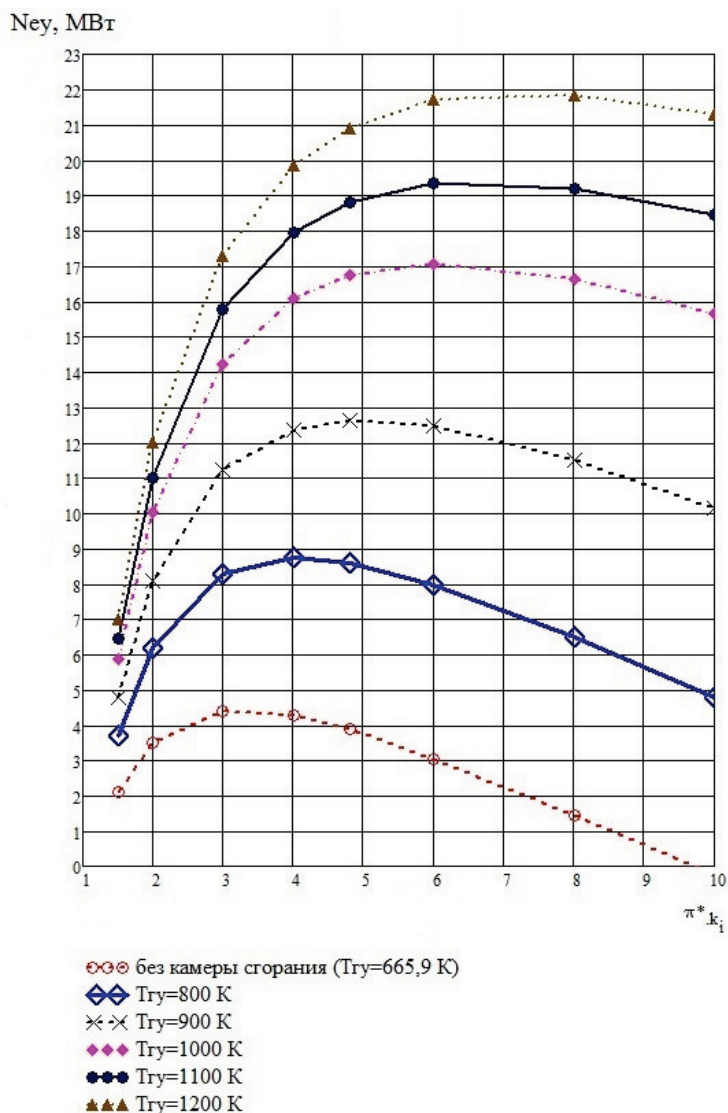


Рис. 3. Изменение мощности $N_{еу}$ утилизационной установки (базовый двигатель НК36-СТ) в зависимости от степени повышения давления в компрессоре $\pi^*_{к1}$ и температуры газа после камеры сгорания $T_{гу}$

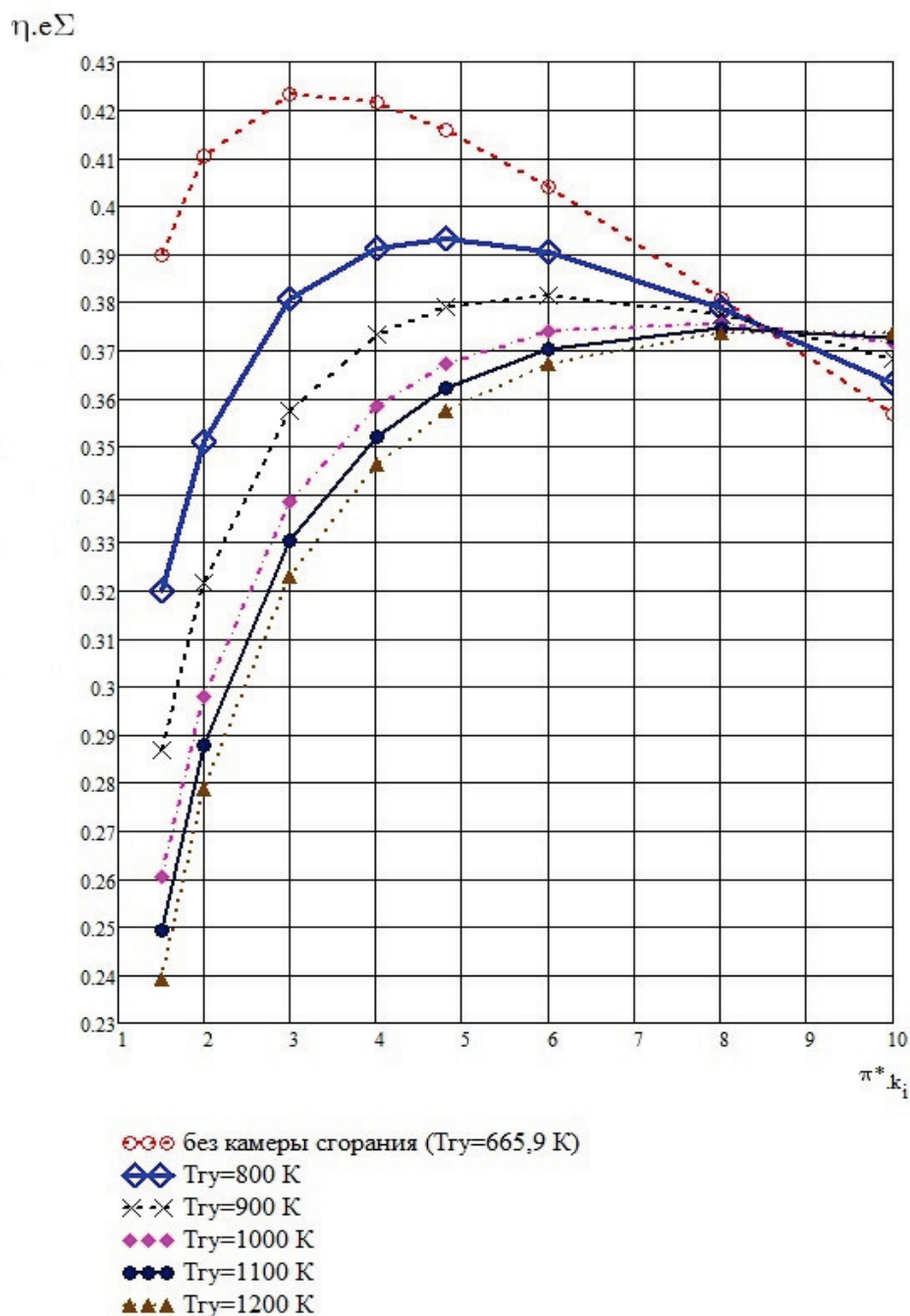


Рис. 4. Изменение КПД комбинированной установки (базовый двигатель НК36-СТ) в зависимости от степени повышения давления в компрессоре $\pi^*_{к_i}$ и температуры газа после камеры сгорания $T_{гy}$

Например, чтобы электроэнергии от 3-х утилизационных установок хватило на привод нагнетателя мощностью 25 МВт, необходимо иметь температуру газа перед турбиной 800 К и степень повышения давления в компрессоре 4,8 (исходя из максимума КПД). Мощность такой утилизационной установки 8,6 МВт, при этом КПД возрастает с 36 % у базового двигателя до 39,3 % у комбинированной установки.

Аналогичные в качественном отношении результаты были получены и для других базовых двигателей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Утилизационная газотурбинная установка открытого цикла обеспечивает производство дополнительного количества электроэнергии от 15 % до 25 % от мощности базового ГТД. Она получается с малым количеством ступеней компрессора и неохлаждаемой турбины. Удельная стоимость ниже, чем у базового двигателя. При этом КПД возрастает с 36 % у базового двигателя НК-36СТ до 42.3 % у комбинированной установки. Применение дожигания топлива перед турбиной утилизационной установки позволяет увеличить выработку электроэнергии до 70 % при температуре продуктов сгорания 1100 К, однако КПД комбинированной установки снижается.

Комбинированные установки с утилизационным контуром, работающим по циклу Ренкина, имеют несколько больший КПД, но более сложны в конструктивном отношении, имеют более плохие массогабаритные характеристики, больше капитальные и эксплуатационные затраты.

Список литературы

1. Бекнев В.С., Михальцев В.Е., Шабаров А.Б., Янсон Р.А. Турбомашины и МГД-генераторы газотурбинных и комбинированных установок – М.: Машиностроение, 1983. 392 с.
2. Манушин Э.А., Михальцев В.Е., Чернобровкин А.П. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок – М.: Машиностроение, 2000. 447 с.
3. A. Schuster, S. Karellas, E. Kakaras, H. Spliethoff Energetic and economic investigation of Organic Rankine Cycle application – Applied Thermal Engineering, 2009.
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. Осипов М.И., Моляков В.Д., Олесевич К.А., Тумашев Р.З. Перспективные направления повышения эффективности ГТУ – Газотурбинные технологии, апрель № 3/2011, с. 2–7
6. Тумашев Р.З., Бодров Н.Г. Когенерационная газотурбинная установка на попутных нефтяных газах с высоким содержанием тяжелых углеводородов – Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012, серия «Машиностроение», специальный выпуск № 7 «Теория и практика энергетического и транспортного машиностроения», с. 155–165.