

УДК 629.7

Разработка программного комплекса для расчета цикла тригенерационной замкнутой газотурбинной установки

04, апрель 2012

Д. Д. Русаков

Студент,
кафедра «Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки»

Научный руководитель: А. Н. Арбеков,
к. т. н., доцент кафедры «Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки»

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

Тригенерационная замкнутая газотурбинная установка (ТЗГТУ) предназначена для выработки электричества, холода и теплоты. Она может иметь параллельную или последовательную схему включения энергетического и холодильного контуров. При проектировании ТЗГТУ для определения рациональных параметров установки необходимо выполнить термодинамический расчет цикла.

Целью работы является разработка программного обеспечения, позволяющего выполнять расчет термодинамического цикла тригенерационной замкнутой газотурбинной установки, реализованной по последовательной или параллельной схеме.

Схема ТЗГТУ последовательной схемы представлена на рисунке 1.

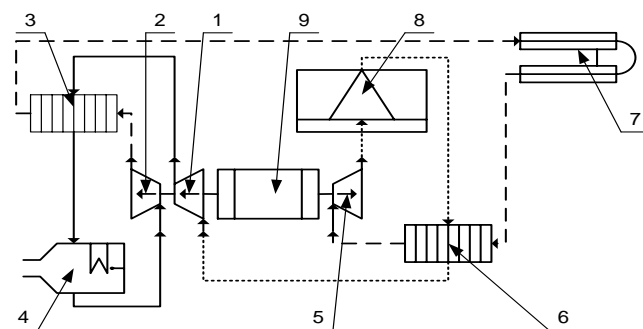


Рис. 1. ТЗГТУ последовательной схемы:

1 – компрессор, 2 – турбина, 3, 6 – рекуператор, 4 – источник тепла, 5 – турбодетандер, 7 – конечной охладитель, 8 – приборный отсек, 9 – генератор

Установка работает следующим образом. Рабочее тело сжимается в компрессоре (1) и поступает в рекуператор (3), где подогревается теплом газа, вышедшего из турбины (2) и поступает в нагреватель (4), в котором его температура

повышается до максимального значения в цикле, после чего поступает в турбину (высокого давления), где срабатывает часть теплоперепада, а затем отдает часть теплоты в рекуператоре. Дальнейшее охлаждение рабочего тела происходит в концевом охладителе (7) и холодильном рекуператоре (6), из которого рабочее тело поступает в турбодетандер (турбину низкого давления), где срабатывает оставшийся теплоперепад, после чего поступает в приборный отсек космического аппарата, где нагревается, отбирая теплоту, выделяемую аппаратурой.

Схема ТЗГТУ параллельной схемы представлена на рисунке 2.

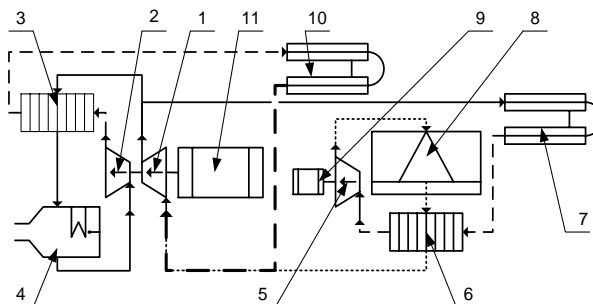


Рис. 2. ТЗГТУ параллельной схемы:

- 1 – компрессор, 2 – турбина, 3, 6 – рекуператор, 4 – источник тепла,
5 – турбодетандер, 7, 10 – концевые охладители, 8 – приборный отсек,
9, 11 – генератор

Установка работает следующим образом. Рабочее тело сжимается в компрессоре (1), выйдя из которого разделяется на две части энергетическую и холодильную. Первая поступает в рекуператор (3), где подогревается теплом газа, вышедшего из турбины (2) и поступает в нагреватель (4), в котором его температура повышается до максимального значения в цикле, после чего поступает в турбину, где срабатывает теплоперепад, а затем через горячую часть рекуператора и концевой охладитель (10) возвращается на вход компрессора. Холодильная часть рабочего тела поступает в концевой охладитель (7), а затем в холодильный рекуператор (6), где охлаждается, после чего расширяется в турбодетандере, срабатывая теплоперепад, в приборном отсеке космического аппарата (8) нагревается, отбирая теплоту, выделяемую аппаратурой, и вновь поступает в холодильный рекуператор для подогрева, после чего смешивается с энергетической частью при входе в компрессор.

В результате выполнения работы был создан программный комплекс ZGTY, который позволяет автоматизировать расчет задач, возникающих при проектировании ТЗГТУ последовательной и параллельной схем:

1. Заданы схема ТЗГТУ, исходные параметры цикла, выбрано рабочее тело. Например, нам необходимо чтобы в "холодном" контуре достигались сверхнизкие температуры, следовательно мы сможем использовать только гелий (самая низкая точка кипения), или нам, наоборот, нужно использовать самый дешевый инертный газ (аргон). Для выбранного рабочего тела и других исходных данных производится расчет. Определяются рациональные параметры цикла.

2. Заданы исходные параметры цикла, выбрано рабочее тело, необходимо выбрать тип схемы ТЗГТУ. Проводим расчет для последовательной и параллельной схемы. Сравниваем полученные результаты и делаем выбор в пользу той или иной схемы.

Программный комплекс ZGTY состоит из двух программ: CGTS.exe и ArrSee.exe, которые сочетают в себе ядро, написанное на алгоритмическом языке

высокого уровня Fortran 90, и объектно-ориентированную оболочку, написанную на языке Delphi.

Программа CGTS.exe служит для решения задач рассмотренных выше. Расчет ТЗГТУ параллельной и последовательной схем производится с использованием решателей Parel.exe и Posled.exe соответственно. Программа ArrSee.exe позволяет просматривать результаты работы программы CGTS.exe и конвертировать их в файл с расширением *.xls, что обеспечивает возможность отображения информации в офисных приложениях MS Office.

Решатели Parel.exe и Posled.exe работают следующим образом: ввод исходных данных из файла в решатель, затем передача управления исполняющим процедурам Posledovatel (для Parel.exe) или Parallelka (для Posled.exe), вывод полученных результатов (запись в файл).

В алгоритме решателя Posled.exe заложен отсев результатов по величине электрической мощности, которая должна быть больше или равна заданной.

В алгоритме решателя Parel.exe отсутствует механизм сортировки, электрическая мощность задается в исходных данных, а по ней определяется величина расхода рабочего тела.

В качестве исходных данных задаются:

1. Физические свойства рабочего тела: газовая постоянная и показатель адиабаты.
2. Опорные температуры цикла: перед компрессором, перед турбинной, после теплообменника потребителя холода и перед ним.
3. Степени регенерации, коэффициенты сохранения полного давления.
4. КПД узлов ТЗГТУ, требуемая электрическая мощность, отборы рабочего тела в контуре.

Результатом расчета являются зависимости параметров ТЗГТУ от степени повышения давления и температуры при выходе из турбодетандера:

1. Температуры за компрессором, за турбиной, при входе и выходе в рекуператоры.
2. Работа компрессора, турбины, турбодетандера, электрическая мощность.
3. Подведенная и отведенная за цикл теплоты, тепловой и электрический коэффициенты полезного действия.

Для тестирования программного комплекса было выполнено математическое моделирование цикла ТЗГТУ последовательной и параллельной схем, исходные параметры которого приведены в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета ЗГТУ

Наименование параметра	Значение
Рабочее тело	Криптон
Газовая постоянная, Дж·кг/К	99,3
Показатель адиабаты	1,67
Электрическая мощность, кВт	10
Холодопроизводительность, кВт	2
Температура перед компрессором, К	333
Температура перед турбиной, К	1123
Температура после потребителя холода, К	278
КПД турбины	0,8
КПД компрессора	0,88
КПД турбодетандера	0,65
КПД генератора	0,95
КПД механический	0,98
Степень регенерации рекуператора по энергетической части	0,95

В результате расчета были получены данные для различных значений температур при выходе из турбодетандера. На рисунках 4 и 5 представлены зависимости теплового КПД цикла и вырабатываемой мощности от степени повышения давления в компрессоре для последовательной схемы.

Эффективность циклов оценим тепловым коэффициентом полезного действия (КПД), который определяется как разность подведенной и отведенной теплот в цикле, отнесенная к подведенной теплоте в энергетической части установки.

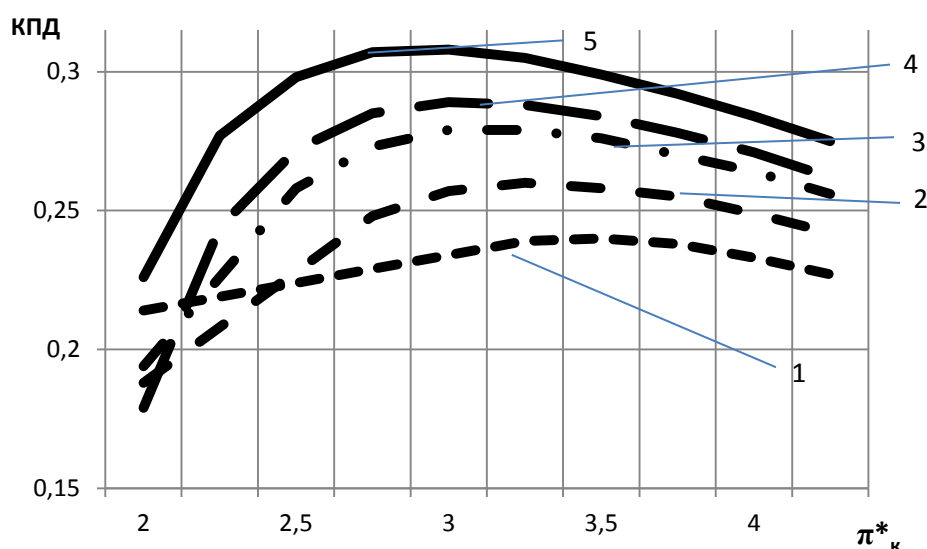


Рис. 4. Зависимость теплового КПД от степени повышения давления и температуры после турбодетандера: 1 – 268 К; 2 – 270 К; 3 – 272 К; 4 – 274 К; 5 – 276 К

Как видно из рисунка 4, с увеличением температуры после турбодетандера максимум теплового КПД смещается в область меньших значений степени повышения давления, так для температуры равной 268 К ее величина составляла 3,25, а для 276 К – 2,8. Температура после турбодетандера зависит от величины подогрева рабочего тела в теплообменнике потребителя холода, а, следовательно, уменьшение подогрева рабочего тела приводит к снижению оптимальной степени повышения давления в компрессоре.

Использованное определение КПД цикла не является объективной характеристикой данного класса установок, что обусловлено неравноценностью электрической энергии, использования "бросовой" теплоты и холодопроизводительности. Наиболее объективным было бы сравнение с комплексом из когенерационной электрогенерирующей установки и холодильной установки, являющейся дополнительной нагрузкой первой. Однако, в данной работе приводятся результаты тестирования программного комплекса, а выбор наиболее подходящего критерия оценки рациональных параметров установки остается за специалистами в области термодинамики комбинированных установок и не является целью данной работы.

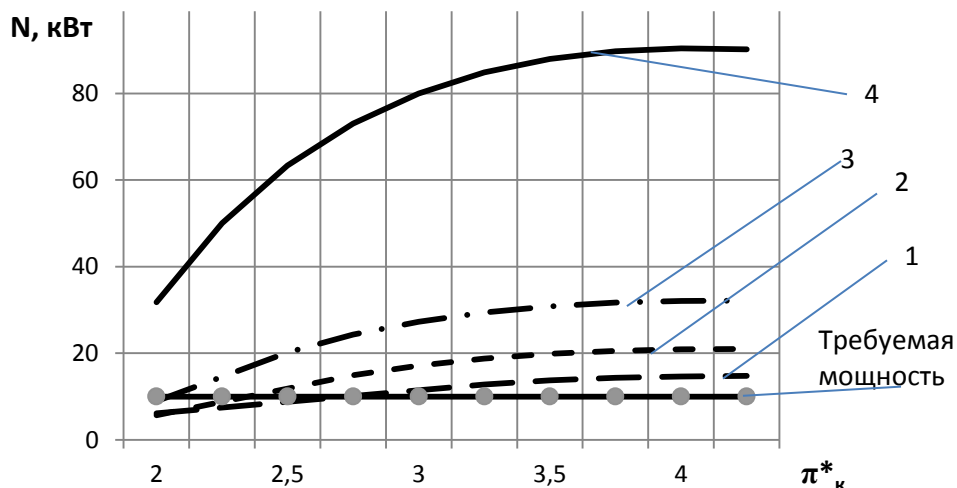


Рис. 5. Зависимости вырабатываемой мощности от степени повышения давления и температуры после турбодетандера: 1 – 268 К; 2 – 270 К; 3 – 272 К; 4 – 276 К

При повышении температуры перед турбодетандером возрастает мощность на клеммах генератора, оптимальное значение степени повышения давления смещается влево (см.рис.4). При необходимости, можно уменьшить величину подогрева рабочего тела в теплообменнике потребителя холода, следовательно, увеличить вырабатываемую электрическая мощность, которая, например, покроеет пиковые нагрузки потребителя.

Для параллельной схемы вырабатываемая мощность постоянна, меняется расход рабочего тела в зависимости от степени повышения давления в компрессоре. Зависимость расхода рабочего тела через контур от степени повышения давления представлена на рисунке 6.

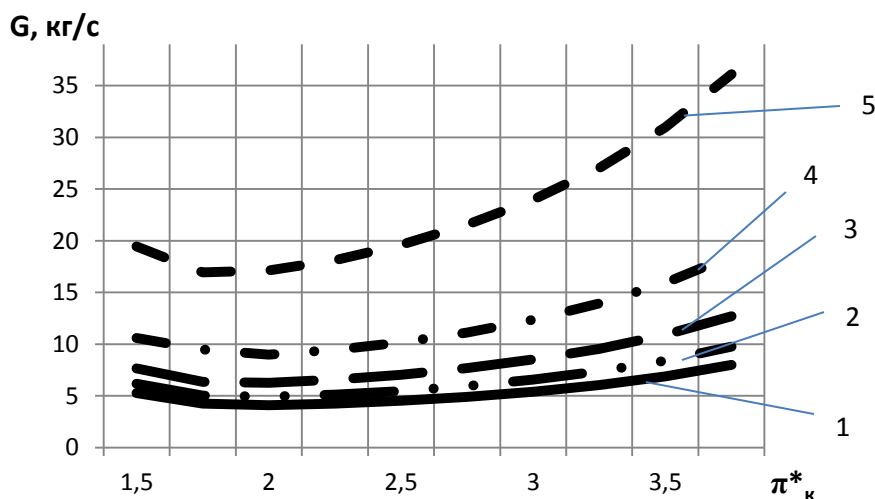


Рис. 6. Зависимость расхода рабочего тела от степени повышения давления и температуры после турбодетандера: 1 – 268 К; 2 – 270 К; 3 – 272 К; 4 – 274 К; 5 – 276 К

Тепловой КПД для параллельной схемы не зависит от величины повышения температуры в теплообменнике потребителя холода, а характер зависимости, как видно из рисунка 7, такой же, как и для последовательной схемы.

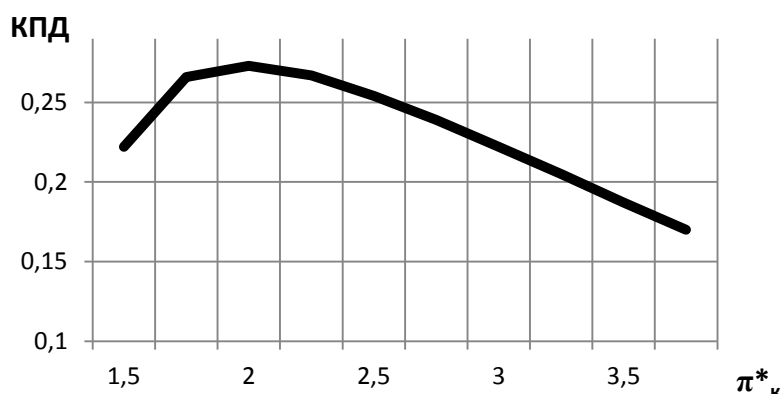


Рис. 7. Зависимость теплового КПД от степени повышения давления

Как видно из рисунка 6, с понижением температуры перед турбодетандером понижается и расход рабочего тела. Оптимальное значение степени повышения давления в компрессоре равно 1,7.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Для получения криогенных температур предпочтительнее параллельная схема ТЗГТУ. Для таких схем с понижением температуры за турбодетандером расход рабочего тела понижается, вырабатываемая электрическая мощность остается постоянной, а тепловой КПД зависит от степени повышения давления в компрессоре. При использовании ТЗГТУ параллельной схемы оптимальные степени повышения давления будут меньше, чем для ТЗГТУ последовательной схемы. Например, при температуре перед турбодетандером равной 268 К оптимальное значение степени повышения давления для параллельной схемы равняется 1,70, а для последовательной схемы – 3,25.

2. В случае, если необходимо кондиционирование при большой холодопроизводительности и температурах близких к 273 К предпочтительнее установки, реализующие последовательную схему. Так как отвод теплоты в окружающую среду осуществляется с более высокого температурного уровня. ТЗГТУ последовательной схемы можно быстрее вывести на новый режим выработки электрической мощности в случае незапланированного повышенного потребления электрической энергии. Недостатком последовательной схемы является необходимость использования больших степеней повышения давления, а значит и более напряженных роторов турбомашин.

Работа выполнена при финансовом содействии Министерства Образования Российской Федерации.

Список литературы

1. 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.
2. Леонтьев А. И., Арбеков А. Н., Бурцев С. А. Сравнение схем космических замкнутых газотурбинных холодоэнергетических установок. /Труды XXXVI

Уральского семинара. Механика и процессы управления. Том 1.– Екатеринбург: УрО
РАН, 2006. – С. 125 – 135.