

# ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ЦИКЛ БЛОКА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ МОДУЛЬНОЙ ЯЭУ С Г依ЛИЕВЫМ РЕАКТОРОМ И ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ РЕГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛОТЫ НА КПД ЦИКЛА

А. А. Филатов<sup>1, а</sup>, Т. В. Доник<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

<sup>2</sup>Інститут технічної теплофізики НАН України

## Аннотация

Выполнен анализ термодинамического цикла блока преобразования энергии модульной ядерной энергетической установки четвёртого поколения с высокотемпературным г依лиевым реактором с тепловой мощностью 250 МВт. Представлен анализ влияния степени регенерации теплоты на эффективность цикла установки.

*Ключевые слова:* модульный г依лиевый реактор, газовая турбина, степень регенерации

## Введение

Перед традиционной электроэнергетикой стоит ряд проблем – повышение стоимости углеводородов, ввод новых экологических ограничений в рамках борьбы с парниковым эффектом и химическим загрязнением окружающей среды. Возможным решением данных проблем является активное развитие ядерной энергетики на основе современных реакторов IV поколения, характеризующихся максимальной безопасностью, во многом благодаря применению концепции самозащитенности.

В настоящее время в ряде стран ведутся работы по международному проекту «Generation IV» в рамках программы «Ядерные реакторы IV поколения». Одной из возможных концепций реакторов четвёртого поколения является, так называемый, высокотемпературный г依лиевый реактор (ВТГР), в котором в качестве рабочего тела используется г依лий [1, 2].

В настоящее время в открытой литературе имеются данные по исследованию энергетической установки ГТ-МГР (международный проект «Газовая турбина – модульный г依лиевый реактор») мощностью 100 МВт [3], в то время как для Украины наиболее перспективными являются энергетические установки мощностью 200...300 МВт. Поэтому данная работа посвящена исследованию термодинамического цикла модульной ядерной энергетической установки ГТ-МГР с высокотемпературным г依лиевым реактором тепловой мощностью 250 МВт в режиме выработки электроэнергии. В работе выполнен расчет параметров цикла, показателей мощности и эффективности ГТУ сложного цикла, исследовано влияние степени регенерации теплоты на эффективность ГТУ.

## 1. Схема МГР и термодинамический цикл БПЭ

Энергетическая установка ГТ-МГР тепловой мощностью 250 МВт (рис. 1) состоит из связанных воедино двух блоков: модульного г依лиевого реактора (МГР) и блока преобразования энергии – газотурбиной установки (БПЭ-ГТУ). БПЭ-ГТУ, состоит из компрессоров низкого и высокого давления, турбины, находящейся на одном валу с компрессорами, регенератора, предварительного и промежуточного теплообменников и генератора, приводимого в действие газовой турбиной. Газотурбинная установка работает по сложному замкнутому циклу Брайтона с регенерацией теплоты и промежуточным охлаждением в компрессоре, в качестве рабочего тела используется г依лий.

$T-S$  Диаграмма сложного газотурбинного цикла с регенерацией тепла и промежуточным охлаждением в компрессоре представлена на рис. 2.

Эффективность рассматриваемого термодинамического цикла характеризуется электрическим КПД ГТУ, который представляет собой отношение электрической мощности цикла  $N_{эл}$  к тепловой мощности реактора  $Q_p$  [4]:

$$\eta_{эл} = N_{эл}/Q_{реакт}$$

и коэффициентом полезной работы цикла:

$$\eta_{пр} = N_{эл}/L_{TG}$$

Подогрев рабочего тела за компрессором за счёт теплоты отработанного газа в специальном теплообменнике (регенераторе) позволяет существенно повысить КПД ГТУ. Количество теплоты, переданной в регенераторе, определяется степенью регенерации, представляющей собой отношение действительно полученной газом теплоты к максимально возможному её количеству при идеальном регенераторе с беско-

<sup>а</sup>artfil\_94@mail.ru

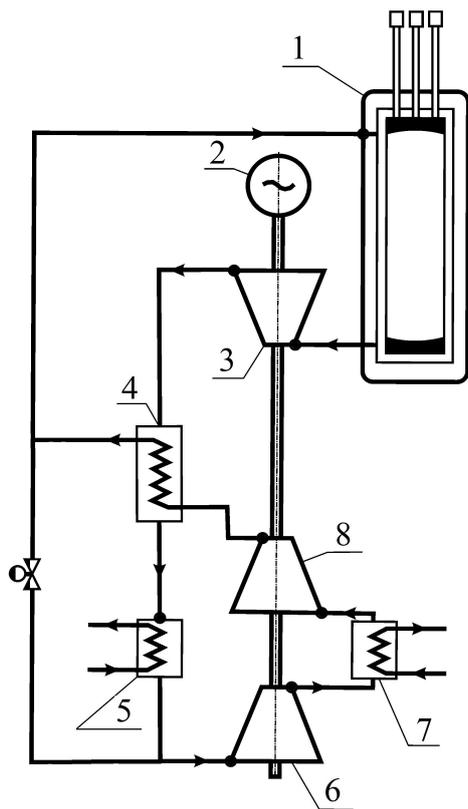


Рис. 1. Схема ГТ-МГР: 1 – реактор; 2 – генератор; 3 – турбина; 4 – регенератор; 5 – предварительный теплообменник; 6 – компрессор низкого давления; 7 – промежуточный теплообменник; 8 – компрессор высокого давления

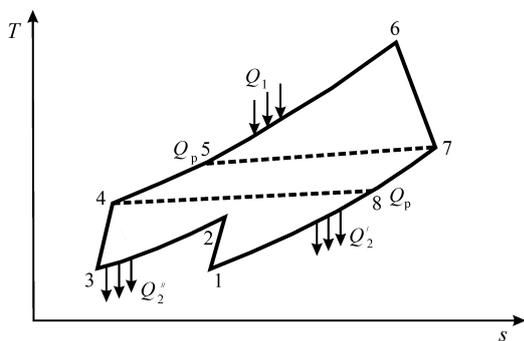


Рис. 2. Сложный цикл ГТУ в  $T-s$  диаграмме: 1 – 2 – сжатие в КНД; 2 – 3 – отвод теплоты в промежуточном ТА; 3 – 4 – сжатие в КВД; 4 – 5 – подвод теплоты в регенераторе; 5 – 6 – подвод теплоты в гелиевом реакторе; 6 – 7 – расширение в турбине; 7 – 8 – отвод теплоты в регенераторе; 8 – 1 – отвод теплоты в предварительном ТА

нечно большой площадью поверхности теплообмена:

$$\sigma = (T_5 - T_4)/(T_7 - T_4),$$

где  $T_5$  действительная температура газа на выходе из регенератора (в реальном цикле  $T_5$  всегда меньше  $T_7$  (см. рис. 2)).

Энергоустановка может эксплуатироваться в двух режимах: в режиме производства электроэнергии и в комбинированном режиме производства электроэнергии и коммунального теплоснабжения. В данной работе расчет термодинамического цикла проведен для базового режима работы установки – режима выработки электроэнергии.

## 2. Результаты исследования

В настоящей работе рассмотрена математическая модель сложного цикла ГТУ, которая включает в себя последовательный расчет параметров цикла для режима выработки электроэнергии. Тестирование математической модели производилось на основе сравнения с имеющимися в литературе данными по гелиевому реактору МГР-100 ГТ электрической мощностью 100 МВт [3]. Полученные результаты показали хорошее соответствие с результатами работы [3]. Погрешности по электрической и тепловой мощности установки составили не более 0.5%, а по расходу гелия в установке 1.3%. Погрешность по электрическому КПД цикла находится в диапазоне 0.87...1.2%.

Основные расчетные исследования выполнены для цикла ГТУ модульного гелиевого реактора тепловой мощностью 250 МВт. Исходные данные для расчета цикла были выбраны на основе анализа имеющихся в литературе данных по КПД элементов ГТУ и эффективности теплообменников, соответствующие достигнутому технологическому уровню в современном газотурбостроении. В расчетах использовались следующие значения теплофизических свойств гелия: удельная теплоемкость при постоянном давлении  $C_p = 5195$  Дж/кг·К, удельная теплоемкость при постоянном объеме  $C_v = 3117$  Дж/кг·К; показатель адиабаты  $k = 1.6667$ .

Для режима выработки электроэнергии степень регенерации цикла и температурный коэффициент промежуточного охлаждения были приняты равными 0.83 и 1.0 соответственно. КПД турбины  $\eta_t$  задавался равным 0.93, КПД компрессора высокого давления  $\eta_{КВД}$  был принят равным 0.875, а КПД компрессора низкого давления  $\eta_{КНД} = 0.85$ .

Результаты расчётов цикла для двух режимов работы ГТУ представлены в таблице 1, а рассчитанные термодинамические диаграммы показаны на рис. 3 и рис. 4.

Из полученных результатов следует, что при тепловой мощности реактора 250 МВт в режиме выработки электроэнергии полезная электрическая мощность установки составляет 115.73 МВт, а электрический КПД – 46.3%. Потребные мощности теплообменного оборудования БПЭ-ГТУ составляют: регенератор – 123.7 МВт; предварительный теплообмен-

Таблица 1. Результаты расчётов цикла работы ГТУ

№ п.п.	Параметр	Режим выработки электроэнергии
1	Потребный расход гелия, кг/с	165.94
2	Суммарная степень повышения давления в компрессоре	2.397
3	Степень повышения давления в КНД	1.557
4	Степень повышения давления в КВД	1.539
5	Степень понижения давления в турбине	2.078
6	Работа турбины, кДж	1376.675
7	Работа цикла, кДж	706.62
8	Потребная мощность регенератора, МВт	123.7
9	Потребная мощность предварительного теплообменника, МВт	132.74
10	Потребная мощность промежуточного теплообменника, МВт	111.18
11	Полезная электрическая мощность ГТУ, МВт	115,73
12	Внутренний КПД цикла, %	46.9
13	Электрический КПД цикла, %	46.3
14	Коэффициент полезной работы цикла	50.7

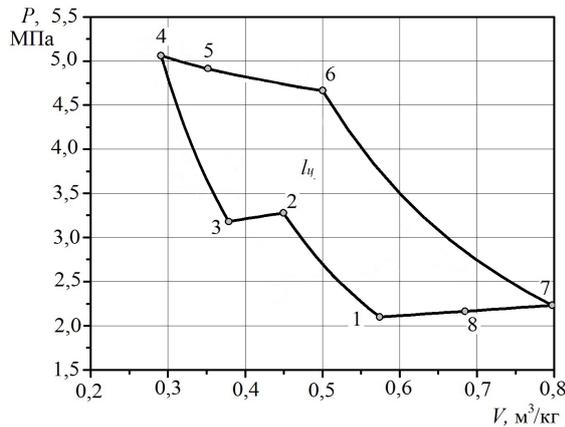


Рис. 3.  $P - V$  диаграмма цикла ГТУ с тепловой мощностью реактора 250 МВт для режима выработки электроэнергии

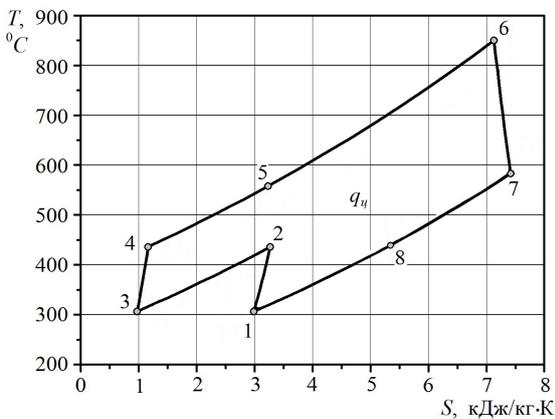


Рис. 4.  $T - S$  диаграмма цикла ГТУ с тепловой мощностью реактора 250 МВт для режима выработки электроэнергии

ник – 132.74 МВт; промежуточный теплообменник – 111.18 МВт.

На рис. 5 представлено влияние степени регенерации теплоты на величину электрического КПД ГТУ и коэффициента полезной работы цикла. Расчеты проводились при значении температурного коэффициента промежуточного охлаждения в компрессоре  $\tau_K = 1.0$ .

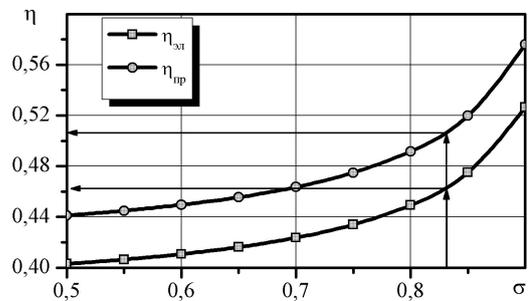


Рис. 5. Зависимость КПД ГТУ от степени регенерации теплоты в цикле для режима выработки электроэнергии

Из рисунка видно, что уменьшение степени регенерации теплоты от заданного значения 0.83 до 0.7 приводит к снижению электрической мощности на 10%. Увеличение же степени регенерации выше 0.83 приводит к значительному росту потребной площади поверхности и массы теплообмена в регенераторе [4]. Таким образом, значение степени регенерации  $\sigma = 0.83$  является достаточно обоснованным для получения высоких значений КПД. Из рисунка также следует, что электрический КПД ГТУ в среднем на 10% меньше, чем коэффициент полезной работы цикла, поскольку часть полной работы турбины используется для привода двухкаскадного компрессора ГТУ.

## Выводы

- 1) В работе исследован сложный термодинамический цикл БПЭ-ГТУ высокотемпературного гелиевого реактора тепловой мощностью 250 МВт при его работе в базовом режиме выработки электроэнергии.
- 2) Выполнены расчёты параметров цикла, показателей мощности и эффективности ГТУ сложного цикла в режиме выработки электроэнергии. Показано, что полезная электрическая мощность установки составила 115.73 МВт с электрическим КПД 46.3%.
- 3) Высокое значение КПД ГТУ сложного цикла достигается при степени регенерации теплоты в цикле не ниже 0.83.

## Перечень использованных источников

1. Zgliczynski, J. B., Silady, F. A., Neylan, A. J. The Gas Turbine-Modular Helium Reactor (GT-MHR)

High Efficiency, Cost Competitive, Nuclear Energy for the Next Century — GA-A21610. General Atomics. — 1994.

2. M. P. LaBar, A. S. Shenoy, W. A. Simon and E. M. Campbell «Status of the GT-MHR for Electricity Production» World Nuclear Association Annual Symposium 3-5 September 2003 — London, — 15 p.
3. Столяревский А.Я., Кодочигов Н.Г., Васяев А.В., Головкин В.Ф., Ганин М.Е. The use of high-Modular Helium Reactor for heating energy-intensive production — «Новости теплоснабжения» №2, — 2011.
4. Арсеньев Л.В., Тырышкин В.Г., Богов И.А. и др. Стационарные газотурбинные установки // Под ред. Л.В. Арсеньева, В.Г. Тырышкина — Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, — 1989. — 543 с.