

# ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ЦИКЛ ЯЭУ С ГЕЛИЕВЫМ РЕАКТОРОМ МОЩНОСТЬЮ 300 МВт ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

М. Н. Парашар<sup>1, а</sup>, Т. В. Доник<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»,  
Физико-технический институт*

<sup>2</sup> *Институт технической теплофизики НАН Украины*

## Аннотация

Выполнен расчет термодинамического цикла блока преобразования энергии ядерной энергетической установки с гелиевым реактором тепловой мощностью 300 МВт в режиме выработки электроэнергии. Рассмотренная энергетическая установка работает по сложному термодинамическому циклу ГТУ, который представляет собой замкнутый цикл Брайтона с регенерацией теплоты и промежуточным охлаждением рабочего тела в компрессоре. Представлен анализ влияния потерь давления в теплообменном оборудовании на эффективность цикла ядерной энергетической установки.

*Ключевые слова:* модульный гелиевый реактор, газовая турбина, степень регенерации

## Введение

Атомные электростанции (АЭС) играют ведущую роль в энергетике Украины. На АЭС производится более 40% от общего количества электроэнергии в стране. Однако в настоящее время практически все блоки атомных электростанций в Украине близки к выработке назначенного эксплуатационного ресурса. На смену им могут прийти новые модульные ядерные энергетические установки (ЯЭУ) четвертого поколения, которые характеризуются высокими экономическими показателями и эксплуатационной надежностью [1, 2]. Одной из перспективных концепций создания атомных электростанций четвертого поколения является концепция высокотемпературного газоохлаждаемого реактора (ВТГР), в котором в качестве рабочего тела используется гелий [1, 2]. Преобразование энергии нагретого гелия в механическую и далее в электрическую энергию осуществляется в блоке преобразования энергии (БПЭ), который представляет собой газотурбинную установку (ГТУ).

В настоящее время для энергосистемы Украины наиболее перспективными представляются ядерные энергетические установки относительно небольшой тепловой мощности до 300 МВт, которые могут быть использованы как в качестве региональных энергетических установок, так и в составе более крупных энергоблоков большой мощности. Целью работы является определение параметров термодинамического цикла БПЭ ГТ-МГР тепловой мощностью реактора 300 МВт в режиме выработки электроэнергии, а также исследование влияния потерь давления в реге-

нераторе на эффективность преобразования энергии в ЯЭУ с газоохлаждаемым гелиевым реактором.

## 1. Схема ГТ-МГР и термодинамический цикл БПЭ ГТ-МГР

Энергетическая установка ГТ-МГР (рис. 1), состоит из двух модулей. Первый модуль представляет собой модульный гелиевый реактор (МГР) и второй – блок преобразования энергии – газотурбинной установки (БПЭ ГТУ), состоящую из турбокомпрессора вертикального типа на электромагнитных подшипниках с двухкаскадным осевым компрессором, газовой (гелиевой) турбины и высокоэффективного теплообменного оборудования. Газотурбинная установка работает по сложному замкнутому циклу Брайтона с регенерацией теплоты и промежуточным охлаждением гелия в компрессоре. Энергоустановка эксплуатируется в режиме производства электроэнергии. Энергетическая установка ГТ-МГР работает по сложному термодинамическому циклу ГТУ, который представляет собой замкнутый цикл Брайтона с регенерацией теплоты  $Q_p$  в регенераторе 4 и охлаждением рабочего тела (гелия) в промежуточном 7 и в предварительном 5 теплообменниках (рис. 1).

В работе рассмотрена математическая модель сложного цикла ГТУ, которая включает в себя последовательный расчет параметров цикла для режима выработки электроэнергии.

## 2. Полученные результаты и их анализ

Расчетное исследование выполнено для цикла ГТУ модульного гелиевого реактора тепловой мощностью 300 МВт. Исходные данные для расчета цикла были выбраны на основе анализа имеющихся в литературе

<sup>а</sup>mayankitajess@gmail.com

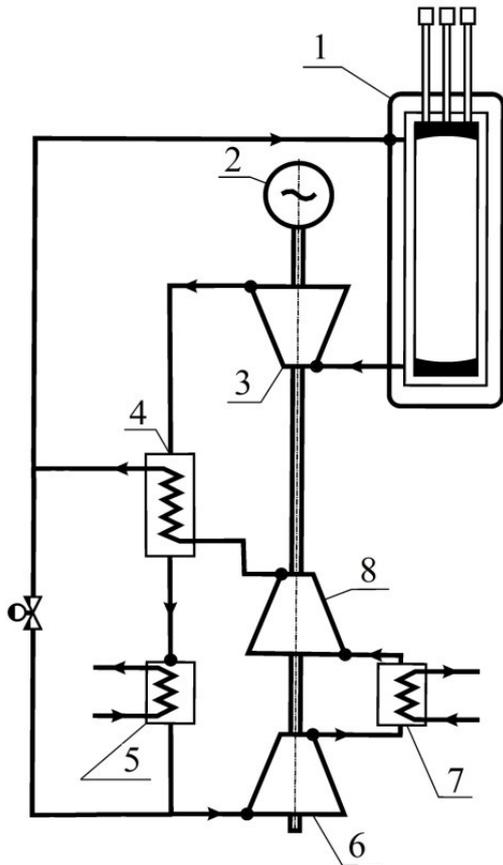


Рис. 1. – Схема ГТ-МГР: 1 – реактор; 2 – генератор; 3 – турбина; 4 – регенератор; 5 – предварительный теплообменник; 6 – компрессор низкого давления; 7 – промежуточный теплообменник; 8 – компрессор высокого давления

данных по КПД элементов ГТУ и эффективности теплообменников, соответствующие достигнутому технологическому уровню в современном газотурбостроении.

Для рассмотренного режима 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 низкого давления  $\eta_{кнд}$  был принят равным 0,875, а КПД компрессора высокого давления  $\eta_{квд}$  – 0,85. Результаты расчётов цикла для режима выработки электроэнергии работы ГТУ представлены в таблице 1, а рассчитанные термодинамические диаграммы цикла показаны на рис. 2.

Из полученных результатов следует, что при тепловой мощности реактора 300 МВт в режиме выработки электроэнергии полезная электрическая мощность установки составляет 144,70 МВт, а электрический КПД – 48,23%. Потребные мощности теплообменного оборудования БПЭ-ГТУ составляют: регенератор – 186,75 МВт; предварительный теплообменник – 153,39 МВт; промежуточный теплообменник – 127,51 МВт. Эффективность рассматриваемого термодинамического цикла характеризуется

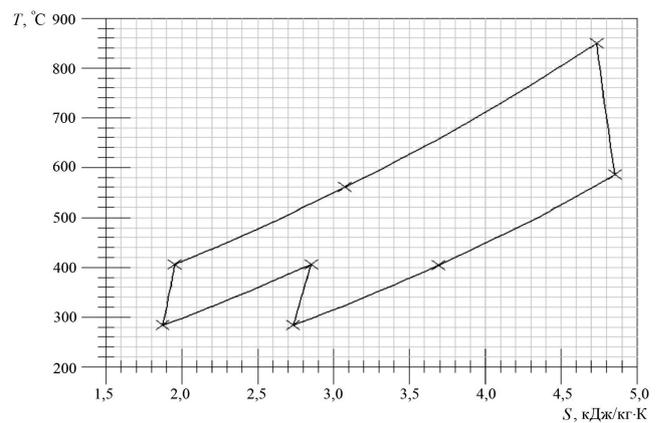
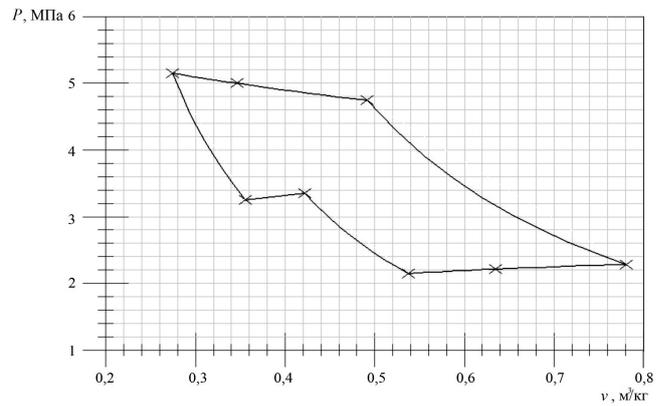


Рис. 2. P-v и T-S диаграммы цикла ГТУ с тепловой мощностью реактора 300 МВт для режима выработки электроэнергии

электрическим КПД ГТУ, который представляет собой отношение электрической мощности цикла  $N_{эл}$  к тепловой мощности реактора  $Q_p$  [3]:

$$\eta_{эл} = \frac{N_{эл}}{Q_p}$$

и электрической мощностью цикла

$$N_{эл} = G_T l_{ц} \eta_T,$$

где  $G_T$  – расход гелия, кг/с;  $l_{ц}$  – удельная работа цикла, Дж/кг;  $\eta_T$  – коэффициент полезного действия электрогенератора переменного тока. На эффективность термодинамического цикла ГТУ особое влияние оказывают относительные потери давления в горячем и холодном трактах регенератора теплоты, а также в горячих трактах промежуточного и предварительного теплообменников. Для рассмотренного режима были заданы значения относительных потерь давления в магистралях теплообменников, соответствующие достигнутому уровню потерь в современных компактных теплообменниках – 3,0% [4].

Для ГТ-МГР широкое применение получили высокоэффективные пластинчато-ребристые теплообменники с использованием теплообменных секций с прямоугольным разрезным оребрением. Далее рассмотрено влияние величины относительных потерь давления в горячей, холодной магистрали регенератора и горячих магистралях предварительного и

Табл. 1. Результаты расчета цикла ГТУ

№ п.п	Параметр	Режим выработки электроэнергии
1	Потребный расход гелия, кг/с	199, 13
2	Суммарная степень повышения давления гелия в компрессоре	2, 397
3	Степень повышения давления в КНД	1, 56
4	Степень повышения давления в КВД	1, 54
5	Степень понижения давления в турбине	2, 08
6	Работа турбины, кДж	1376, 67
7	Работа цикла, кДж	736, 27
8	Потребная мощность регенератора, МВт	186, 75
9	Потребная мощность предварительного теплообменника, МВт	153, 39
10	Потребная мощность промежуточного теплообменника, МВт	127, 51
11	Полезная электрическая мощность ГТУ, МВт	144, 70
12	Полезная тепловая мощность ГТУ, МВт	262, 57
13	Внутренний КПД цикла, %	48, 87
14	Электрический КПД цикла, %	48, 23
15	Коэффициент полезной работы цикла	52, 78

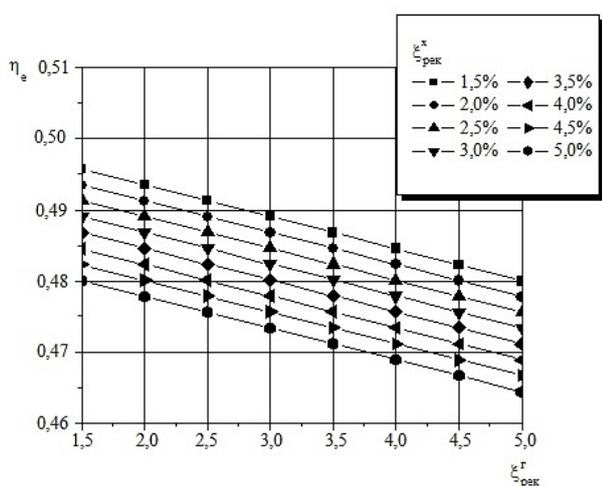


Рис. 3. Зависимость электрического КПД ГТУ от относительных потерь давления в горячей и холодной магистрали регенератора

промежуточных теплообменников при их отклонении от расчетных значений на электрический КПД и мощность термодинамического цикла БПЭ ГТ-МГР. На рис. 3, 4 представлены зависимости электрического КПД и электрической мощности ГТУ от относительных потерь давления в горячей и холодной магистрали регенератора.

Данные зависимости позволяют определить электрический КПД и электрическую мощность ГТУ при заданных значениях относительных потерь давления в горячей и холодной магистралях рекуператора. Как видно из рисунка, при увеличении относительных потерь давления в горячей магистрали регенератора от 3,0 до 5,0% электрический КПД и электрическая мощность снижаются на 1,8%. При увеличении относительных потерь давления в хо-

лодной магистрали от расчетного значения 3,0% до 5,0% электрический КПД и мощность при фиксировании значения = 3,0% снижается от 48,23% до 47,33%, и от 144,7 до 142,0 МВт соответственно.

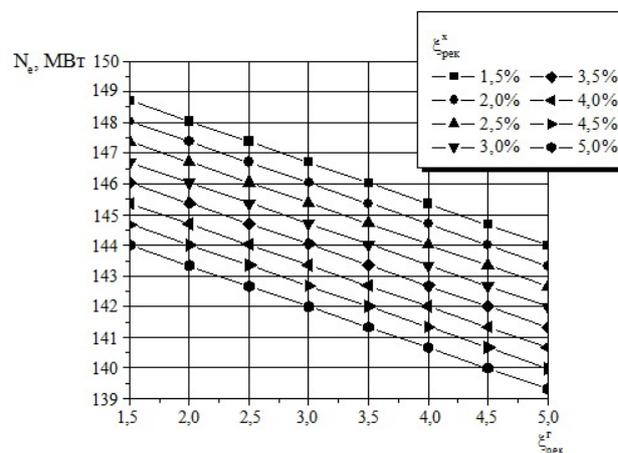


Рис. 4. Зависимость электрической мощности ГТУ от относительных потерь давления в горячей и холодной магистрали регенератора

Уровень потерь давления в горячих магистралях предварительного и промежуточного теплообменников также оказывает влияние на эффективность и мощность ГТУ. На рис. 5 представлены зависимости электрического КПД и электрической мощности ГТУ от относительных потерь давления в предварительном и промежуточном теплообменниках. Увеличение относительных потерь давления от расчетного значения 3,0% до 5,0% в горячих магистралях предварительного и промежуточного теплообменников приводит к снижению электрического КПД и мощности установки примерно на 1,8%.

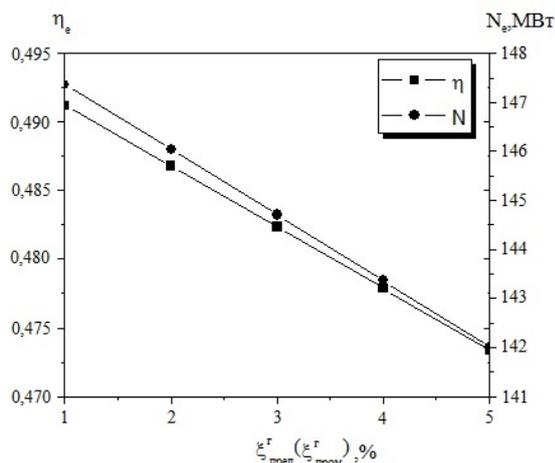


Рис. 5. Зависимость электрического КПД ГТУ от относительных потерь давления в горячей и холодной магистрали регенератора

Таким образом, при увеличении относительных гидравлических потерь в теплообменном оборудовании блока преобразования энергии хотя бы 1,0% происходит снижение электрического КПД цикла до 1,0%, а электрической мощности до 1,6...2,0%. Это означает, что высокая эффективность цикла ГТУ может быть достигнута только при условии предельно высокой эффективности всех элементов ГТУ: компрессора, газовой турбины, а также используемого в ее составе высокотемпературного теплообменного оборудования.

## Выводы

1. Проведен расчет сложного термодинамического цикла БПЭ-ГТУ высокотемпературного гелиевого реактора четвертого поколения тепловой мощностью 300 МВт при его работе в режиме выработки электроэнергии.

2. При работе в режиме выработки электроэнергии полезная электрическая мощность установки составляет 144,70 МВт с электрическим КПД – 48,23%.

3. При росте относительных потерь давления в горячей и холодной магистрали регенератора теплоты от расчетного значения 3,0% до 5,0% электрический КПД и электрическая мощность снижаются на 1,8...3,7%. Увеличение относительных потерь в предварительном и промежуточном теплообменниках от 3,0 до 5,0% приводит к снижению электрического КПД от 48,23% до 47,33% и электрической мощности – от 144,70 до 142,0 МВт.

4. В целом, увеличение гидравлических потерь в теплообменном оборудовании на 1,0% приводит к снижению электрического КПД цикла ГТ-МГР на 1,8% и электрической мощности на 1,6...2,0%.

## Перечень использованных источников

1. J. V. Zgliczynski The Gas Turbine-Modular Helium Reactor (GT-MHR) High Efficiency /J. V. Zgliczynski, F. A. Silady, A. J. Neylan //Cost Competitive, Nuclear Energy for the Next Century. — 1994. — GA-A21610. General Atomics.
2. LaBar M. P. Status of the GT-MHR for Electricity Production /M. P. LaBar, A. S. Shenoy, W. A. Simon, E. M. Campbell//World Nuclear Association Annual Symposium 3-5 September. — 2003. — London, 2003. — 15 p.
3. Арсеньев Л.В. Стационарные газотурбинные установки [Текст] / Л. В. Арсеньев, В. Г. Тырышкин, И. А. Богов и др.; под ред. Л. В. Арсеньева, В. Г. Тырышкина. — Ленинград : Машиностроение, Ленинградское отд. 1989. — 543 с.
4. Чичиндаев А.В. Оптимизация компактных пластинчато-ребристых теплообменников. Часть I. Теоретические основы [Текст] /А.В.Чичиндаев: учебное пособие.. — Новосибирск: Издательство НГТУ.— 2003. — 400 с.