

УДК 621.039.5; 621.438

## АНАЛИЗ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ЦИКЛА ГТУ ЯДЕРНОЙ МОДУЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ГЕЛИЕВЫМ РЕАКТОРОМ

Халатов А.А., академик НАН Украины, Северин С.Д., канд. техн. наук, Доник Т.В., канд. техн. наук

*Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, Киев, 03680, Украина*

Приведений анализ термодинамического цикла блока перетворения энергии перспективной модульной ядерной энергетической установки четвертого поколения с высокотемпературным гелиевым реактором с тепловой мощностью 250 МВт. Представлений анализ влияния параметров рабочего процесса газотурбинной установки сложного термодинамического цикла Брайтона на показатели его эффективности.

Приведен анализ термодинамического цикла блока преобразования энергии модульной ядерной энергетической установки четвертого поколения с высокотемпературным гелиевым реактором с тепловой мощностью 250 МВт. Представлен анализ влияния параметров рабочего процесса газотурбинной установки сложного термодинамического цикла Брайтона на показатели его эффективности.

The analysis of energy conversion system thermodynamics cycle for perspective modular fourth-generation nuclear power plant with high temperature helium reactor with thermal capacity 250MW is represented in the article. The analysis of working process parameters influence for gas-turbine power plant of complicated thermodynamics Briton cycle on the indexes of its efficiency is represented.

Библ. 5, табл. 2, рис. 5.

**Ключевые слова:** модульная ядерная энергетическая установка, высокотемпературный гелиевый реактор, газотурбинная установка, сложный термодинамический цикл Брайтона, термодинамическая эффективность цикла.

$G$  – расход гелия;  
 $L$  – работа турбины;  
 $N$  – мощность цикла;  
 $P$  – давление потока;  
 $T$  – температура потока;  
 $Q$  – тепловая мощность;  
 $\eta$  – коэффициент полезного действия.

### Индексы:

пр – полезная работа;  
 р – реактор;  
 т – турбина;  
 эл – электрический.

### Сокращения:

АЭС – атомная электростанция;  
 БПЭ – блок преобразования энергии;  
 ВТГР – высокотемпературный гелиевый реактор;  
 ГТ-МГР – газовая турбина-модульный гелиевый реактор;  
 ГТУ – газотурбинная установка;  
 КВД – компрессор высокого давления;  
 КНД – компрессор низкого давления;  
 КПД – коэффициент полезного действия;  
 ТА – теплообменный аппарат.

### Введение

В настоящее время в Украине около половины электроэнергетики производится на тепловых электростанциях с электрической мощностью блоков 200...300 МВт. Практически все блоки этих станций отработали проектный ресурс (100 тыс. часов) и должны быть в ближайшие 10...15 лет выведены из эксплуатации. По экологическим показателям тепловые электростанции Украины оснащены только системой улавливания твердых частиц и не соответствуют международным тре-

бованиям. На смену им создаются электростанции нового поколения, среди которых можно отметить модульные ядерные станции мощностью 100...300 МВт, которые обладают хорошими экологическими показателями, за счет низких вредных выбросов в окружающую среду.

Ядерные станции играют важную роль в энергетике Украины. Они производят около 43 % электроэнергии от общего количества электрической энергии. Основным этапом развития ядерной энергетики в настоящее время является

создание экологически чистых реакторов 4-го поколения повышенной безопасности [1, 2]. В ряде стран ведутся работы по международному проекту «Generation IV» в рамках программы «Ядерные реакторы IV поколения». Высокий уровень безопасности новых реакторов достигается за счет совершенствования активных, введения пассивных защитных и локализирующих систем, а также реализации концепции внутренней безопасности. Для сокращения финансовых рисков и повышения безопасности ядерных реакторов в настоящее время наиболее перспективным направлением представляется разработка малых энергоблоков тепловой мощностью 200...300 МВт, которые могут быть построены как самостоятельно, так и в составе более крупных блоков. Одной из возможных концепций создания ядерных электростанций четвертого поколения является разрабатываемый в настоящее время в разных странах, так называемый, ВТГР, в котором в качестве теплоносителя для реактора и рабочего тела для БПЭ-ГТУ используется гелий [1, 2].

В проекте ВТГР для преобразования тепловой энергии в электрическую используется современная ГТУ, которая включает в себя газовую турбину вертикального типа на электромагнитных подшипниках с использованием высокоэффективного теплообменного оборудования. Эта концепция легла в основу международного проекта «Газовая турбина-модульный гелиевый реактор» – ГТ-МГР [1]. Преобразование энергии нагретого гелия в механическую и далее в электрическую энергию осуществляется при помощи газотурбинной установки, работающей по сложному замкнутому циклу Брайтона с регенерацией теплоты и промежуточным охлаждением рабочего тела в компрессоре.

Принципиальными особенностями ГТ-МГР являются: высокая эффективность производства электроэнергии (КПД до 50 %); повышенная безопасность, обусловленная самозащищённостью и невозможностью плавления активной зоны при тяжелых аварийных ситуациях; капсулирование установки и размещение ее под землей; эффективное использование ядерного топлива и возможность реализации различных вариантов топливного цикла (уран, плутоний, торий); сни-

жение теплового и радиационного воздействия на окружающую среду.

В настоящее время в открытой литературе имеются только данные по исследованию энергетической установки ГТ-МГР мощностью 100 МВт [3], в то время как для Украины наиболее перспективными являются установки мощностью 200...300 МВт. Поэтому данная работа посвящена исследованию модульной ядерной энергетической установки ГТ-МГР мощностью 250 МВт, а именно, термодинамического цикла БПЭ-ГТУ с высокотемпературным гелиевым реактором в режиме выработки электроэнергии и в комбинированном режиме производства электроэнергии и коммунального теплоснабжения. В работе выполнен расчет параметров цикла, показателей мощности и эффективности ГТУ сложного цикла, исследовано влияние степени регенерации теплоты и температурного коэффициента промежуточного охлаждения в компрессоре на эффективность ГТУ.

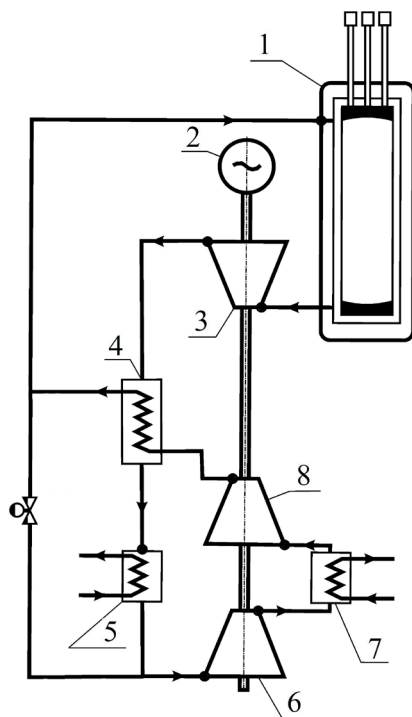
#### *Схема ГТ-МГР и термодинамический цикл БПЭ-ГТУ*

Энергетическая установка ГТ-МГР тепловой мощностью 250 МВт (рис. 1) состоит из связанных воедино двух блоков: модульного гелиевого реактора (МГР) и блока преобразования энергии – газотурбиной установки (БПЭ-ГТУ). В основе концепции МГР лежит использование активной зоны с графитовым замедлителем, ядерным топливом в виде микросфер с многослойными керамическими покрытиями и гелием в качестве теплоносителя. В активной зоне полностью отсутствуют металлоконструкции. Это позволяет достигнуть температуры гелия на выходе из реактора 850...950 °С, что обеспечивает высокую эффективность производства электроэнергии в сложном термодинамическом цикле, а также возможность использовать МГР как источник промышленной высокотемпературной теплоты для нужд производства электроэнергии и коммунального теплоснабжения. Блок преобразования энергии состоит из компрессоров низкого и высокого давления, вертикальной турбины, находящейся на одном валу с компрессорами, регенератора, предварительного и промежуточного теплообменников и генератора переменного тока, приводимого в действие газовой

турбиной.

Энергоустановка эксплуатируется в двух режимах: в режиме производства электроэнергии и в комбинированном режиме производства электроэнергии и коммунального теплоснабжения. При работе установки в комбинированном режиме теплота в теплообменниках 5 и 7 (рис. 1) отводится к теплоносителю в сетевых теплообменниках. В режиме производства только электроэнергии сетевой контур отключен, и сбросное тепло отводится в окружающую среду в градирнях.

Установка работает следующим образом: нагретый гелий из реактора поступает в турбину, где после расширения направляется в регенератор и далее в предварительный теплообменник. После охлаждения в предварительном теплообменнике гелий поступает в КНД, охлаждается в промежуточном теплообменнике, далее поступает в КВД, проходит через регенератор и возвращается в реактор.



**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.**

Использование в качестве рабочего тела гелия, обладающего высокой изобарной теплоемкостью и высоким значением газовой постоянной, обеспечивает относительно небольшие для атомных станций габариты газовой турбины.

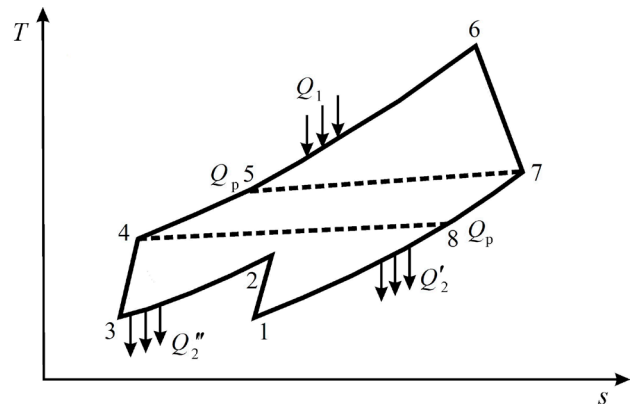
T-S диаграмма термодинамического цикла ГТУ, работающая по замкнутому циклу Брайтона с регенерацией теплоты  $Q_p$  и промежуточным охлаждением гелия в компрессоре представлена на рис. 2. Использование сложного цикла для БПЭ ГТ-МГР при всех технологических проблемах, связанных с его практической реализацией, является условием, необходимым для достижения высокой эффективности ГТУ при сравнительно низких значениях максимальной температуры цикла ( $T_6 = 850 \dots 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Основной характеристикой термодинамического цикла является его эффективность, которая оценивается электрическим КПД ГТУ, представляющим собой отношение удельной работы цикла к затраченной в цикле удельной теплоте [4]:

$$\eta_{\text{эл}} = N_{\text{эл}} / Q_p, \quad (1)$$

где  $Q_p$  – тепловая мощность реактора, Вт, а также коэффициентом полезной работы цикла

$$\eta_{\text{пр}} = N_{\text{эл}} / (L_T G). \quad (2)$$



**Рис. 2. Сложный цикл ГТУ в T-S диаграмме: 1-2 – сжатие в КНД; 2-3 – отвод теплоты  $Q_2''$  в промежуточной ТА; 3-4 – сжатие в КВД; 4-5 – подвод теплоты  $Q_p$  в регенераторе; 5-6 – подвод теплоты  $Q_1$  в гелиевом реакторе; 6-7 – расширение в турбине; 7-8 – отвод теплоты  $Q_p$  в регенераторе; 8-1 – отвод теплоты  $Q_2'$  в предварительном ТА.**

Как указывалось выше, для повышения показателей эффективности ГТУ в цикле предусмотрено промежуточное охлаждение рабочего тела в компрессоре (процесс 2-3), а также подогрев рабочего тела за компрессором за счёт теплоты отработанного гелия (процесс 4-5) в регенераторе.

Охлаждение гелия в предварительном теплообменнике до температуры  $T_1$ , а затем, в промежуточном теплообменнике до температуры  $T_3$  позволяет уменьшить работу сжатия цикла, а, следовательно, увеличить полную удельную работу цикла. При этом чем ниже температура  $T_3$ , то есть, чем глубже промежуточное охлаждение, тем больше прирост удельной работы цикла. Глубина промежуточного охлаждения гелия в компрессоре оценивается температурным коэффициентом промежуточного охлаждения [4]:

$$\tau_k = T_3/T_1. \quad (3)$$

Количество теплоты переданной в регенераторе определяется степенью регенерации, представляющей собой отношение теплоты, полученной гелием, к максимально возможному её количеству в идеальном регенераторе с бесконечно большой площадью поверхности теплообмена:

$$\sigma = (T_5 - T_4)/(T_7 - T_4), \quad (4)$$

где  $T_5$  – действительная температура гелия на выходе из регенератора.

Применение регенерации теплоты в цикле позволяет повысить термическую эффективность ГТУ, однако в реальных циклах ГТУ степень регенерации имеет предельно достижимое значение, зависящее от уровня гидравлических потерь в элементах ГТУ и тепловой эффективности регенератора теплоты. Целесообразная величина степени регенерации зависит от параметров рабочего тела и определяется по минимальным приведенным затратам. Как правило, для реальных ГТУ значение степени регенерации находится в диапазоне  $0,7 < \sigma < 0,85$ .

#### **Результаты исследований и их анализ**

На начальном этапе была создана математическая модель сложного цикла ГТУ, включающая последовательный расчет параметров цикла для

режима выработки электроэнергии и комбинированного режима. Алгоритм расчёта цикла Брайтона с регенерацией теплоты и промежуточным охлаждением воздуха в компрессоре реализован в виде компьютерной программы «Helium v1.2» на алгоритмическом языке Compaq Visual Fortran 6.6. Программа выполнена в графическом интерфейсе под операционную систему Windows и позволяет в интерактивном режиме выполнять анализ цикла гелиевой ГТУ как в режиме выработки электроэнергии, так и в комбинированном режиме работы.

Тестирование математической модели гелиевой ГТУ производилось на основании имеющихся в открытой литературе данных по гелиевому реактору МГР-100 ГТ электрической мощностью 100 МВт [3]. Полученные результаты показали хорошее соответствие с результатами работы [4]. 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 исследования проводились для цикла ГТУ модульного гелиевого реактора тепловой мощностью 250 МВт. Начальные данные для расчета цикла ГТУ были выбраны на основании анализа имеющихся в литературе сведений по КПД турбомашин и эффективности теплообменников, соответствующие достигнутому технологическому уровню в современном газотурбостроении (таблица 1). 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 –  $k = 1,6667$ .

В режиме выработки электроэнергии значения степени регенерации принималось равным 0,83, что соответствует технологическим достижениям в области теплообменного оборудования. Для комбинированного режима степень регенерации составляет 0,493, что определяется из условия обеспечения регенеративного цикла при пониженном режиме работы энергетической установки.

Результаты расчётов циклов для двух рассмотренных режимов работы ГТУ представлены в

Табл. 1. Исходные данные для расчета цикла ГТУ

№ п.п.	Параметр	Режим выработки электроэнергии	Комбинированный режим
1	Тепловая мощность реактора, МВт	250	250
2	Температура гелия на входе в реактор, °С	560	500
3	Температура гелия на выходе из реактора, 0°С	850	800
4	Давление гелия на входе в реактор, МПа	5,0	5,0
5	Температура гелия на выходе из турбины, °С	585	595
6	КПД турбины	0,93	0,93
7	КПД компрессора низкого давления	0,875	0,875
8	КПД компрессора высокого давления	0,85	0,85
9	Коэффициент эффективности регенератора	0,85	0,8
10	Коэффициент эффективности предварительного теплообменника	0,85	0,815
11	Коэффициент эффективности промежуточного теплообменника	0,85	0,815
12	Относительные потери давления в горячей магистрали регенератора, %	3,0	3,0
13	Относительные потери давления в холодной магистрали регенератора, %	3,0	1,5
14	Относительные потери давления в горячей магистрали предварительного теплообменника, %	3,0	3,0
15	Относительные потери давления в горячей магистрали промежуточного теплообменника, %	3,0	3,0
16	Относительные потери давления в контуре охлаждения реактора, %	5,0	5,0
17	Температурный коэффициент промежуточного охлаждения в компрессоре	1,0	1,048
18	КПД электрогенератора	0,987	0,987
19	Степень регенерации цикла	0,83	0,493

таблице 2, а рассчитанные термодинамические диаграммы циклов показаны на рис. 3.

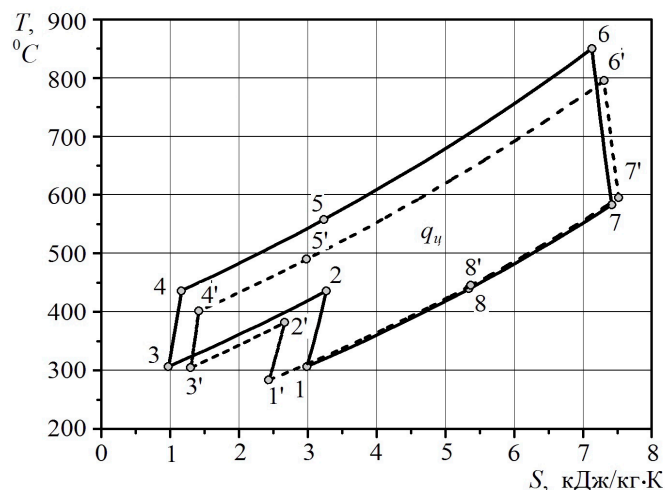
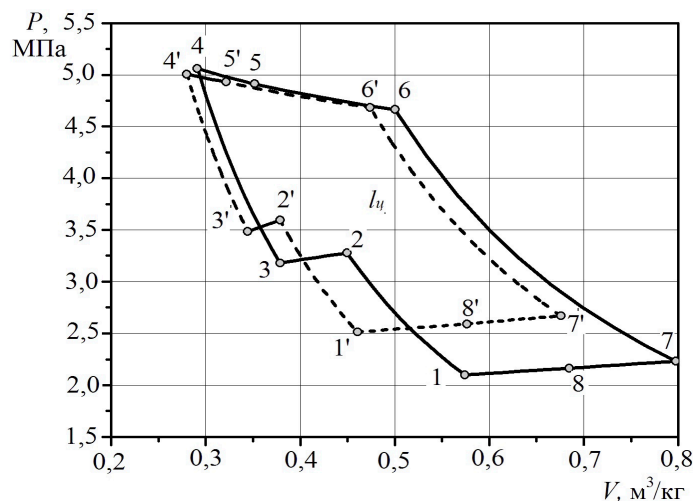
Как следует из полученных результатов, при тепловой мощности реактора 250 МВт, в режиме выработки электроэнергии полезная электрическая мощность установки составляет 115,73 МВт, а электрический КПД – 46,3 %. Потребные мощности теплообменного оборудования БПЭ-ГТУ составляют: регенератор – 123,7 МВт; предварительный теплообменник – 132,74 МВт; промежуточный теплообменник – 111,18 МВт. В комбинированном режиме полезная электриче-

ская мощность составляет только 69,66 МВт с электрическим КПД равным 27,86 %, полезная тепловая мощность составляет 182,13 МВт, потребные мощности регенератора, предварительного и промежуточного теплообменников равны 123,7 МВт, 132,74 МВт и 65,99 МВт соответственно.

Для современного теплообменного оборудования достигнутые значения степени регенерации и температурного коэффициента промежуточного охлаждения в компрессоре составляют 0,83 и 1,0, соответственно.

Табл. 2. Результаты расчета цикла ГТУ

№ п.п.	Параметр	Режим выработки электроэнергии	Комбинированный режим
1	Потребный расход гелия, кг/с	165,94	160,41
2	Суммарная степень повышения давления в компрессоре	2,397	2,018
3	Степень повышения давления в КНД	1,557	1,465
4	Степень повышения давления в КВД	1,539	1,427
5	Степень понижения давления в турбине	2,078	1,78
6	Работа турбины, кДж	1376,675	1064,975
7	Работа цикла, кДж	706,62	439,97
8	Потребная мощность регенератора, МВт	123,7	123,7
9	Потребная мощность предварительного теплообменника, МВт	132,74	132,74
10	Потребная мощность промежуточного теплообменника, МВт	111,18	65,99
11	Полезная электрическая мощность ГТУ, МВт	115,73	69,66
12	Полезная тепловая мощность ГТУ, МВт	-	182,13
13	Внутренний КПД цикла, %	46,9	28,2
14	Электрический КПД цикла, %	46,3	27,9
15	Кэффицент полезной работы цикла	50,7	30,5
16	Эксергетический КПД цикла	69,7	51,98



**Рис. 3. P-V и T-S диаграммы цикла ГТУ с тепловой мощностью реактора 250 МВт: сплошная линия – режим выработки электроэнергии; пунктирная линия – комбинированный режим.**

Однако достижение этих значений является технологически сложным и экономически затратным. В связи с этим в работе исследовано влияние степени регенерации теплоты и температурного коэффициента промежуточного охлаждения в компрессоре на показатели эффективности ГТУ в режиме выработки электроэнергии.

На рис. 4 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  $\tau_k = 1,0$ .

Из рисунка видно, что уменьшение степени регенерации теплоты от заданного значения 0,83 до 0,7 приводит к снижению электрической мощности на 10 %. В то же время увеличение степени регенерации выше 0,83 приводит к значительному росту потребной площади поверхности и массы теплообмена в регенераторе [4, 5]. 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.

На рис. 5 представлены зависимости электрического КПД и КПД полезной работы ГТУ от температурного коэффициента промежуточного охлаждения гелия в компрессоре ( $\sigma = 0,83$ ). Из представленных данных следует, что для достижения высокого значения КПД цикла (46,3 %) температурный коэффициент промежуточного охлаждения в компрессоре должен соответствовать значению 1,0.

Результаты расчета показывают, что высокая эффективность цикла ГТУ может быть достигнута только при условии предельно высоких значений КПД всех элементов ГТУ: компрессора, газовой турбины, а также используемого в ее составе высокотемпературного теплообменного оборудования.

### Выводы

1. В работе выполнено исследование сложного термодинамического цикла БПЭ-ГТУ высокотемпературного гелиевого реактора мощ-

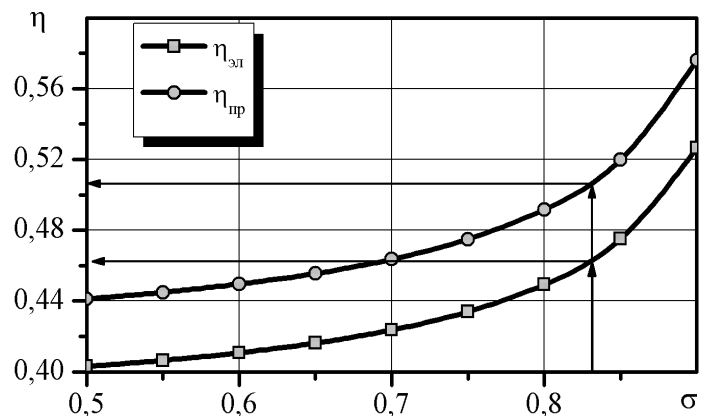


Рис. 4. Зависимость КПД ГТУ от степени регенерации теплоты в цикле для режима выработки электроэнергии ( $\tau_k = 1,0$ ).

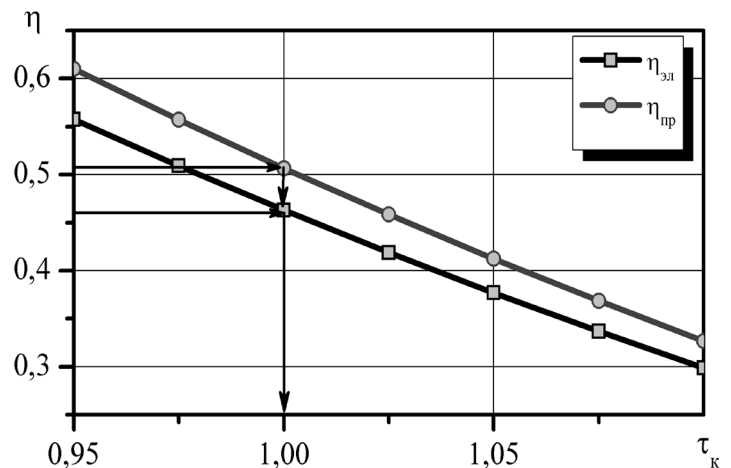


Рис. 5. Зависимость КПД ГТУ от температурного коэффициента промежуточного охлаждения в компрессоре ( $\sigma = 0,83$ ).

ностью 250 МВт при его работе в режиме выработки электроэнергии и в комбинированном режиме – с выработкой электрической и тепловой энергии для коммунального теплоснабжения.

2. Разработана математическая и компьютерная модель сложного цикла ГТУ с регенерацией теплоты и промежуточным охлаждением гелия в компрессоре. Тестирование математической выполнено с использованием имеющихся в литературе данных для МГР-100ГТ электрической мощностью 100 МВт.

3. Выполнены расчёты параметров цикла, показателей мощности и эффективности ГТУ сложного цикла для двух режимов работы – выработки электроэнергии и комбинированного режима. Показано, что при работе в режиме выработки электроэнергии полезная электрическая мощность установки составила 115,73 МВт с электрическим КПД 46,3 %. В комбинированном режиме мощность составляет 69,66 МВт с электрическим КПД 27,86 %. При этом полезная тепловая мощность установки для использования в коммунальном теплоснабжении составила 182,13 МВт.

4. Определены потребные мощности теплообменного оборудования БПЭ-ГТУ высокотемпературного гелиевого реактора мощностью 250 МВт: в режиме выработки электроэнергии – потребная мощность регенератора составляет 123,7 МВт, предварительного теплообменника – 132,74 МВт, промежуточного теплообменника – 111,18 МВт; в комбинированном режиме – 123,7 МВт, 132,74 МВт и 65,99 МВт соответственно.

5. Показано, что высокое значение КПД ГТУ сложного цикла достигается при степени регенерации теплоты в цикле не ниже 0,83, значении температурного коэффициента промежуточного охлаждения в компрессоре  $\tau_k = 1,0$  и при условии обеспечения предельно высоких значений КПД

всех элементов ГТУ, а также используемого высокотемпературного теплообменного оборудования.

#### ЛИТЕРАТУРА

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. *LaBar M. P., Shenoy A. S., Simon W. A., Campbell E. M.* «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.* Применение высокотемпературных модульных гелиевых реакторов для теплоснабжения энергоёмких производств. – «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.

5. *Чичиндаев А.В.* Оптимизация компактных пластинчато-ребристых теплообменников. Часть I. Теоретические основы: Учебное пособие. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2003. – 400 с.



## ANALYSIS OF THERMODYNAMIC CYCLE OF GAS TURBINE PLANT OF NUCLEAR MODULAR POWER INSTALLATION WITH HELIUM REACTOR

Khalatov A.A., Severin S.D., Donyk T.V.

Institute of Engineering Thermophysics  
of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
vul. Zhelyabova, 2a, Kyiv, 03680, Ukraine

In this paper the perspective modular nuclear power plant of the fourth generation having capacity 250 MW, which consists of two units connected together: a modular high-temperature helium reactor and energy conversion unit – gas turbine plant of the direct cycle. The analysis of the thermodynamic cycle of gas turbine plant (GTP) with the high temperature helium reactor in electric power generation mode and in the combined mode of electricity production and municipal heat supply was given. A mathematical model of a complex cycle of the gas turbine plant (GTP) was developed, testing the model on the basis of the data available in the open press on the helium reactor having the electric power 100 MW was made. Basic studies to calculate the cycle of the GTP with thermal capacity of the reactor 250 MW were conducted. The calculations of the cycle parameters, capacity and efficiency indices of the GTP of complex cycle for two modes of its operation were conducted. It was shown that at the thermal capacity of the reactor 250 MW in operation of the electric power generation mode the useful electric power of the plant is 115.73 MW with the electric efficiency 46.3 %, in the combined mode is 69.66 MW with the electric efficiency 27.86 %. The useful thermal capacity of the plant for the use in the central heating will be 182.13 MW. The analysis of the influence of parameters of the

working process of the GTP on the its efficiency indices has shown that high value of the efficiency of the GTP (46.3 %) is achieved at the heat regeneration degree in the cycle not less than 0.83 and the value of the temperature coefficient of the intermediate cooling in the compressor about  $\tau_k = 1,0$  and on condition of providing with extremely high values of the efficiency of all elements of the GTP, and the high temperature heat transfer equipment used as well.

References 5, tables 2, fig. 5.

**Key words:** gas cooled nuclear power plant, high temperature helium reactor, gas turbine plant of the complex thermodynamic Braiton cycle, cycle thermodynamics efficiency.

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. Stolyarevskiy A.Ya., Kodochigov N.G., Vasyaev A.V., Golovko V.F., Ganin M.E. The use of high-Modular Helium Reactor for heating energy-intensive production. – «Novosti teplosnabzheniya» №2, 2011.
4. Arsenev L.V., Tyiryishkin V.G., Bogov I.A. *i dr.* Stationary gas turbine plants // Pod red. L.V. Arseneva, V.G. Tyiryishkina – L.: Mashinostroenie, Leningradskoe otdelenenie, 1989. – 543 s.
5. Chichindaev A.V. Optimization of compact plate-fin heat exchangers. Chast I. Teoreticheskie osnovyi: Uchebnoe posobie. – Novosibirsk: Izdatelstvo NGTU, 2003. – 400 p.

Получено 15.12.2014  
Received 15.12.2014