

УДК 621.039.5; 621.438

АНАЛИЗ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ЦИКЛА БЛОКА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ЯЭУ С ГЕЛИЕВЫМ РЕАКТОРОМ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ВОДОРОДА

^{1,2}Халатов А.А., академик НАН Украины, ¹Северин С.Д., канд. техн. наук, ^{1,2}Доник Т.В., канд. техн. наук

¹ Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2-А, Киев, 03680, Украина

² Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина

Наведено аналіз термодинамічного циклу блоку перетворення енергії модульної ядерної енергетичної установки четвертого покоління з високотемпературним гелієвим реактором тепловою потужністю 250 МВт для спільного виробництва електроенергії і водню. Дається аналіз впливу параметрів парогенератора на показники ефективності циклу.

Приведен анализ термодинамического цикла блока преобразования энергии модульной ядерной энергетической установки четвертого поколения с высокотемпературным гелиевым реактором тепловой мощностью 250 МВт для совместного производства электроэнергии и водорода. Дается анализ влияния параметров парогенератора на показатели эффективности цикла.

The analysis is presented considering thermodynamic cycle of the energy conversion unit of the fourth-generation modular nuclear power plant with a high-temperature helium reactor of 250 MWt thermal power designated for the combined production of electricity and hydrogen. The analysis is given providing influence of steam generator parameters on the thermodynamic cycle efficiency.

Библ. 5, табл. 2, рис. 4.

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

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

Индексы:

пг – парогенератор;
 пр – полезная работа;
 р – реактор;
 т – турбина;

эл – электрический.

Сокращения:

АЭС – атомная электростанция;
 БПЭ–ГТУ – блок преобразования энергии – газотурбинная установка;
 ВТГР – высокотемпературный гелиевый реактор;
 ГТ–МГР – газовая турбина – модульный гелиевый реактор;
 ГТМГР–ВЭП – газовая турбина – модульный гелиевый реактор – высокотемпературный электролиз пара;
 ГТУ – газотурбинная установка.

Введение

В настоящее время АЭС играют ведущую роль в энергетике Украины, ежегодно они производят более 45 % электроэнергии от общего количества в стране. В ближайшие 10...12 лет срок эксплуатации большинства АЭС Украины

истекает и на смену им должны прийти атомные электростанции следующего поколения. Одним из перспективных направлений для Украины представляется использование модульных атомных энергоблоков тепловой мощностью реакторов 200...300 МВт, которые могут быть использова-

ны как для самостоятельной работы, так и в составе более крупных блоков. Это способствует не только сокращению финансовых рисков, но и повышению безопасности функционирования ядерных реакторов.

Главным направлением развития ядерной энергетики является создание экологически чистых реакторов 4-го поколения повышенной безопасности. В ряде стран в рамках программы «Ядерные реакторы IV поколения» ведутся активные работы по международному проекту «Generation IV». Одной из возможных концепций создания модульных ядерных электростанций четвертого поколения является концепция ВТГР, в котором в качестве теплоносителя для охлаждения реактора и рабочего тела для блока преобразования энергии, представляющего собой газотурбинную установку сложного цикла (БПЭ–ГТУ), используется гелий [1, 2]. При практической реализации программы развития ядерной энергетики одним из перспективных направлений является получение водорода из воды с помощью энергии, производимой на модульных АЭС. Известно, что водород является хорошим энергоносителем для использования в двигателях, автономных генераторах электричества и теплоты, его удобно применять в теплоснабжении, транспортировать и аккумулировать. Для получения водорода используются замкнутые термохимические и термоэлектрохимические циклы, высокотемпературный электролиз, а также другие способы. Сегодня стоимость производства 1 кг водорода при конверсии метана составляет 2...5 долл. США, при газификации угля – 2...2,5 долл. США, при электролизе воды за счет энергии ветра – 7...11 долл. США и энергии Солнца – 10...30 долл. США. При использовании атомной энергетики уже сегодня эта цифра составляет 2...2,3 долл. США за 1 кг водорода и может быть существенно снижена. Таким образом, производство водорода из воды с помощью энергии ядерных реакторов может в самое ближайшее время стать кардинальным решением мировой энергетической проблемы.

Производство водорода с использованием термохимических, термоэлектрохимических циклов и методом высокотемпературного электролиза пара требует пара высоких параметров, и чем

более высокую температуру теплоносителя может обеспечить реакторная установка, тем выше суммарный КПД производства водорода [3]. В настоящее время в ряде стран разрабатываются проекты по объединению ВТГР с высокотемпературными электролизёрами, что позволит достичь значений суммарного КПД производства водорода до 50 %. Совместное производство электроэнергии и водорода на АЭС позволяет решить также и другую важную для Украины проблему – проблему существенно переменного суточного графика нагрузок (ночного «провала»), который характеризуется снижением потребления электрической нагрузки в ночное время. Разница между максимально и минимально потребной мощностью составляет около 7 ГВт, а пиковые нагрузки покрываются за счет работы тепловых электростанций в маневренном режиме. В настоящее время маневренных мощностей в Украине не хватает, а строительство гидро- и гидроаккумулирующих станций требует больших финансовых затрат и отчуждения плодородных земель. В соответствии с мировой практикой для стабильной работы энергосистемы маневренные мощности в стране должны составлять не менее 15 % от установленной мощности, в то время как в Украине эта цифра находится на уровне 10 %. При выработке водорода во время ночного снижения нагрузки излишек электроэнергии используется для производства и накопления водорода, а в период пиковых и полупиковых нагрузок запасенный водород может использоваться для выработки электрической и тепловой энергии.

Цель настоящей работы – исследование термодинамического цикла БПЭ–ГТУ с высокотемпературным гелиевым реактором для совместного производства электрической энергии и водорода. В статье выполнен расчет параметров термодинамического цикла, мощности и эффективности ГТУ сложного цикла, исследовано влияние термодинамических параметров парогенератора на эффективность цикла.

Схема ГТМГР–ВЭП и термодинамический цикл БПЭ–ГТУ

Схема реакторной установки ГТМГР–ВЭП для совместного производства электроэнергии и перегретого водяного пара требуемых пара-

метров с целью получения водорода методом высокотемпературного электролиза пара показана на рис. 1.

Энергетическая установка ГТМГР–ВЭП имеет контуры производства электроэнергии и теплоты, а также перегретого пара высокой температуры. Контур производства электроэнергии и теплоты представляет собой гелиевый ядерный реактор и блок преобразования энергии, подробно рассмотренный в [4]. Как и в ядерной установке для производства электроэнергии [4], блок преобразования энергии состоит из компрессоров низкого и высокого давления, вертикальной гелиевой турбины, находящейся на од-

ном валу с компрессорами, предварительного и промежуточного теплообменников, регенератора и электрогенератора. Источником тепла в цикле для производства электроэнергии и перегретого пара является модульный гелиевый реактор. Температура гелия на выходе из реактора составляет 850 °С, что не превышает соответствующей температуры в прототипе энергетической установки ГТ–МГР. Использование в качестве рабочего тела гелия, обладающего высокой изобарной теплоёмкостью и высоким значением газовой постоянной, обеспечивает относительно небольшие для атомных электростанций габариты газовой турбины.

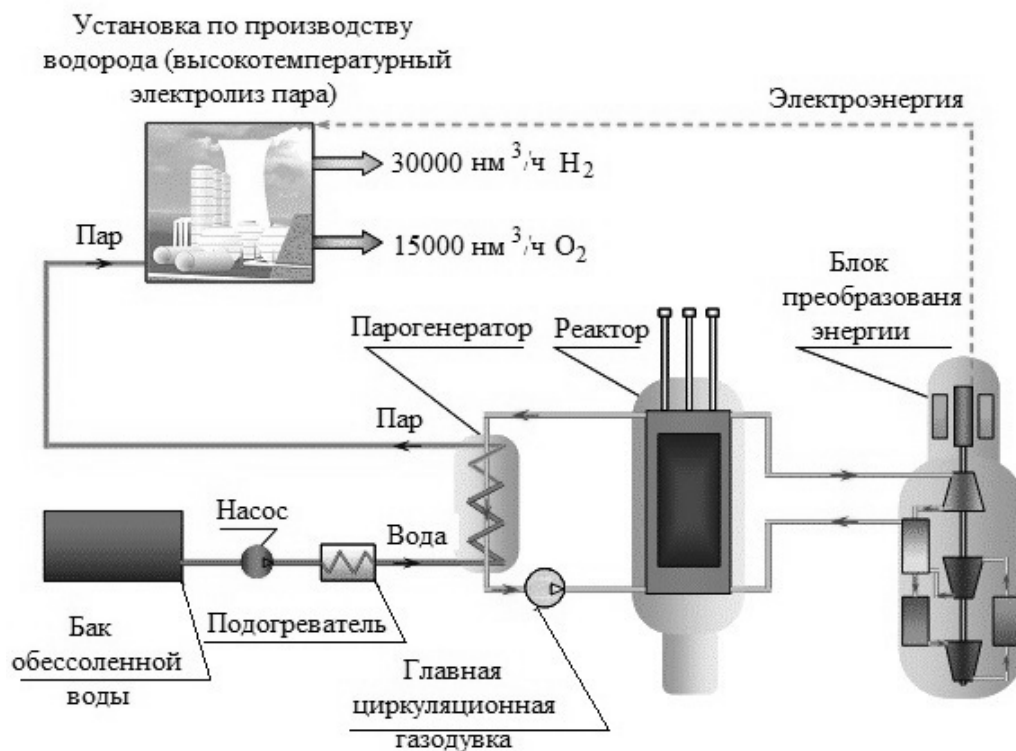


Рис. 1. Принципиальная схема ГТМГР–ВЭП.

Главным отличием схемы реакторной установки ГТМГР–ВЭП от установки ГТ–МГР является наличие отдельного гелиевого контура с включённым парогенератором. Циркуляция нагретого гелия через парогенератор осуществляется при помощи главной циркуляционной газодувки. Подвод обессоленной воды в парогенератор и отвод пара производится через крышку парогенератора. Перегретый до требуемых

параметров пар отводится по трубопроводам в установку высокотемпературного электролиза на твердооксидных электрохимических элементах, в которой водяной пар разлагается на водород и кислород с последующим разделением этих реагентов. Электроэнергия необходимая для работы установки высокотемпературного электролиза пара (ВЭП) поступает от электрогенератора БПЭ.

Главными достоинствами рассматриваемой

схемы является исключение дополнительных гидравлических потерь в цикле БПЭ на прокачку гелия через парогенератор, которые неизбежно приводят к снижению электрического КПД цикла, а также относительно невысокая температура рабочего тела (гелия) в реакторной зоне, что предъявляет менее жесткие требования к конструкционным материалам, из которых изготовлен реактор.

Основными характеристиками термодинамического цикла с учетом контура производства перегретого пара является его эффективность, которая оценивается электрическим КПД ГТУ (коэффициентом использования теплоты), представляющим собой отношение электрической мощности цикла к теплоте, подведенной к рабочему телу в реакторе [5]:

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

и коэффициентом полезной работы цикла

$$\eta_{вн} = \frac{l_{ц}}{q_p}, \quad (2)$$

где Q_p – тепловая мощность реактора, Вт; $N_{эл} = G_r \cdot l_{ц} \cdot \eta_r$ – электрическая мощность, МВт,

где $G_r = \frac{Q_p - Q_{пг}}{q_p}$ – потребный расход гелия в цик-

ле БПЭ; $q_p = h_6 - h_5 = C_p (T_6 - T_5)$ – удельная теплота, полученная рабочим телом в реакторе.

Результаты исследований и их анализ

Математическая модель и алгоритм расчета сложного цикла ГТУ, включающая последовательный расчет параметров цикла для режима выработки электроэнергии и производства перегретого пара в парогенераторе аналогичны рассмотренным в работе [4]. Основные исследования проводились для ГТУ модульного гелиевого реактора тепловой мощностью 250 МВт. Начальные данные для расчета цикла ГТУ были выбраны на основании анализа имеющихся в литературе данных по КПД турбомашин, эффективности теплообменников и парогенератора, соответствующие достигнутому технологическому уровню в современном газотурбостроении (табл. 1). Для сравнения в таблице представлены исходные данные, которые были использованы ранее при

расчёте цикла БПЭ для производства электроэнергии [4].

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 – $k = 1,6667$. Результаты расчетов циклов для двух рассмотренных режимов работы ГТУ представлены в таблице 2.

Результаты расчетов циклов для двух рассмотренных режимов работы ГТУ представлены в таблице 2.

Предварительный расчёт парогенератора выполнен с использованием метода тепловых балансов с учётом реальных теплофизических свойств воды и водяного пара. В результате выполненных расчетов были получены потребный расход гелия через парогенератор (13,6 кг/с), паропроизводительность парогенератора (10,5 кг/с) и значение его тепловой мощности (25 МВт) при отсутствии потерь теплоты в окружающую среду, (КПД парогенератора 1,0 %). Более точные расчёты парогенератора могут привести к некоторому росту его потребной мощности, поэтому в качестве рабочего диапазона потребной мощности парогенератора ГТМГР–ВЭП с тепловой мощностью реактора 250 МВт будет рассматриваться диапазон 25...35 МВт.

Как следует из расчетов цикла, 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 режиме совместного производства электроэнергии и перегретого пара при тепловой мощности парогенератора 25 МВт и температуры гелия на выходе из парогенератора 395 °С полезная электрическая мощность цикла составляет 104,16 МВт с электрическим КПД равным 41,7 %. При этом потребные мощности регенератора, предварительного и промежуточного теплообменников равны 111,33 МВт, 119,47 МВт и 100,06 МВт, соответственно.

Табл. 1. Исходные данные для расчета цикла ГТУ

№ п.п.	Параметр	Режим выработки электроэнергии	Выработка электроэнергии и производство перегретого пара
1	Тепловая мощность реактора, МВт	250	250
2	Тепловая мощность парогенератора, МВт	-	25
3	Температура гелия на входе в реактор, °С	560	500
4	Температура гелия на выходе из реактора, °С	850	850
5	Температура гелия на выходе из парогенератора, °С	-	395
6	Давление гелия на входе в реактор, МПа	5,0	5,0
7	Температура гелия на выходе из турбины, °С	585	595
8	КПД турбины	0,93	0,93
9	КПД компрессора низкого давления	0,875	0,875
10	КПД компрессора высокого давления	0,85	0,85
11	Коэффициент эффективности регенератора	0,85	0,8
12	Коэффициент эффективности предварительного теплообменника	0,85	0,85
13	Коэффициент эффективности промежуточного теплообменника	0,85	0,85
14	Относительные потери давления в горячей магистрали регенератора, %	3,0	3,0
15	Относительные потери давления в холодной магистрали регенератора, %	3,0	3,0
16	Относительные потери давления в горячей магистрали предварительного теплообменника, %	3,0	3,0
17	Относительные потери давления в горячей магистрали промежуточного теплообменника, %	3,0	3,0

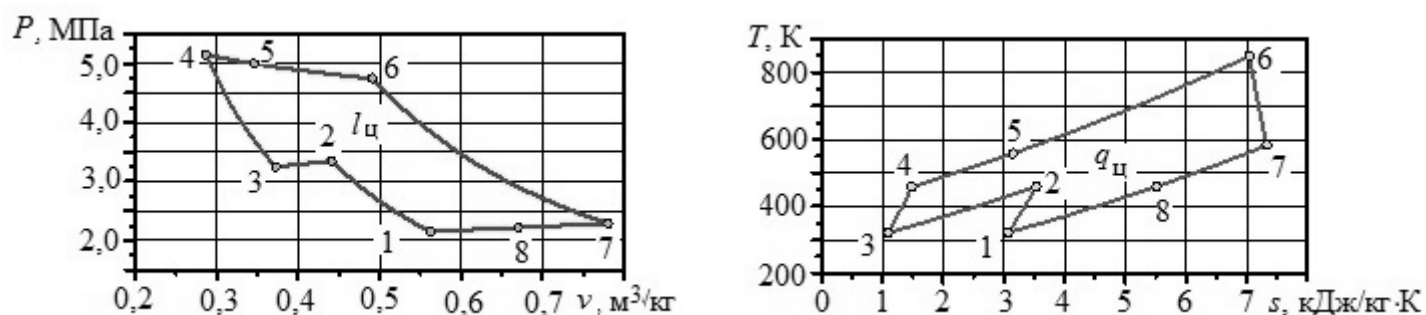


Рис. 2. P - v и T - s диаграммы цикла ГТУ с тепловой мощностью реактора 250 МВт при выработке электроэнергии и производстве перегретого пара.

Табл. 1. Результаты расчета цикла ГТУ

№ п.п.	Параметр	Режим выработки электроэнергии	Выработка электроэнергии и производство перегретого пара
1	Потребный расход гелия через БПЭ, кг/с	165,94	149,35
2	Потребный расход гелия через парогенератор, кг/с	-	13,556
3	Суммарная степень повышения давления в компрессоре	2,397	2,397
4	Степень повышения давления в компрессоре низкого давления	1,557	1,557
5	Степень повышения давления в компрессоре высокого давления	1,539	1,539
6	Степень понижения давления в турбине	2,078	2,078
7	Работа турбины, КДж	1376,7	1376,7
8	Удельная работа цикла, КДж/кг	706,62	706,62
9	Потребная мощность регенератора, МВт	123,7	111,33
10	Потребная мощность предварительного теплообменника, МВт	132,74	119,47
11	Потребная мощность промежуточного теплообменника, МВт	111,18	100,06
12	Полезная электрическая мощность ГТУ, МВт	115,73	104,16
13	Тепловая мощность парогенератора, МВт	-	25,0
14	Паропроизводительность парогенератора, кг/с	-	11,59
15	Внутренний КПД цикла, %	46,9	42,2
16	Электрический КПД цикла, %	46,3	41,7
17	Коэффициент полезной работы цикла	50,7	50,7

На рис. 2 представлены P-v и T-s диаграммы цикла ГТУ блока преобразования энергии ГТМГР–ВЭП. Видно, что циклы ГТУ блока преобразования энергии ГТМГР–ВЭП, построенные в удельных параметрах, при одинаковой тепловой мощности реактора 250 МВт не отличаются от циклов, рассчитанных для БПЭ ГТ–МГР при производстве электроэнергии [4]. А различие заключается в том, что часть теплоты, полученной рабочим телом в реакторе, расходуется на производство высокотемпературного пара. В связи с этим площади циклов в абсолютных величинах, соответствующие работе и теплоте циклов, в рассматриваемом случае будут меньше, чем площади соответствующих циклов БПЭ ГТ–МГР для производства электроэнергии.

На рис. 3 представлена зависимость элек-

трической мощности БПЭ от тепловой мощности парогенератора. Видно, что при расчетной (базовой) тепловой мощности парогенератора ($Q_{\text{ПГ}} = 25$ МВт) полезная электрическая мощность БПЭ будет равна 104,16 МВт. При возможном увеличении мощности парогенератора до 35 МВт происходит снижение электрической мощности на 5,2 % до 99 МВт. В то же время снижение мощности парогенератора с 25 до 15 МВт приводит к увеличению полезной электрической мощности ГТУ на 4,1 %.

На рис. 4 представлена зависимость электрического и внутреннего КПД БПЭ от тепловой мощности парогенератора. Видно, что для базового режима тепловой мощности парогенератора (25 МВт) с паропроизводительностью парогенератора 10,5 кг/с при температуре пара 800 °С

обеспечивается достаточно высокий электрический КПД цикла (41,7 %). Как следует, увеличение мощности парогенератора до 35 МВт приводит к снижению электрического КПД цикла до 39,8 %, а снижение мощности парогенератора с 25 МВт до 15 МВт – к его росту до 43,5 %.

Таким образом, в рабочем диапазоне изменения тепловой мощности парогенератора ГТМГР–ВЭП от 15 до 35 МВт при его паропроизводительности 10,5 кг/с электрический КПД установки будет изменяться в диапазоне 43,5...39,8 %, а электрическая мощность от 99 до 108,75 МВт.

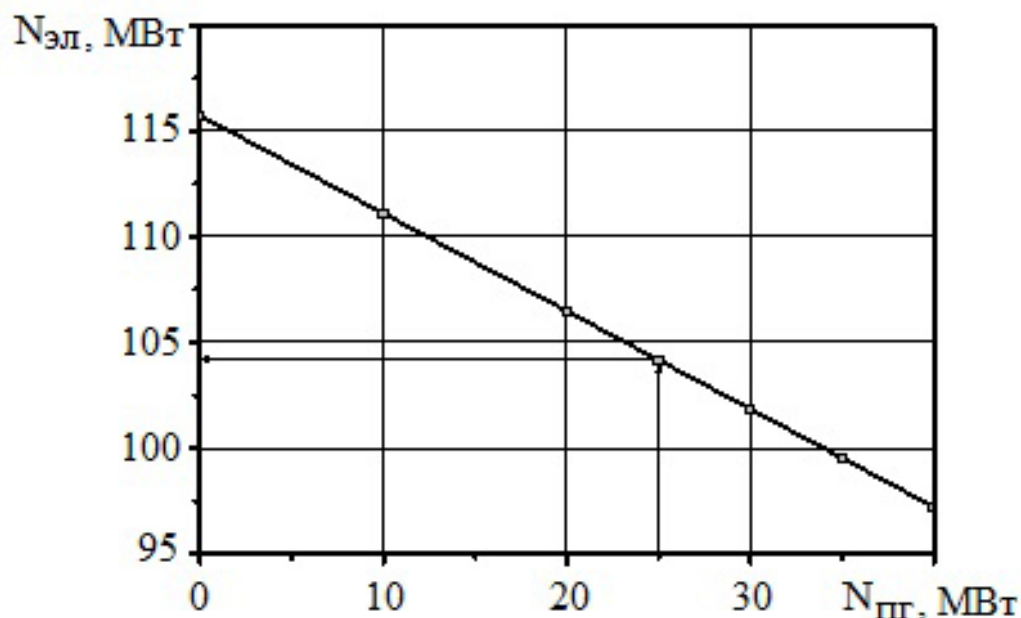


Рис. 3. Зависимость электрической мощности БПЭ от тепловой мощности парогенератора.

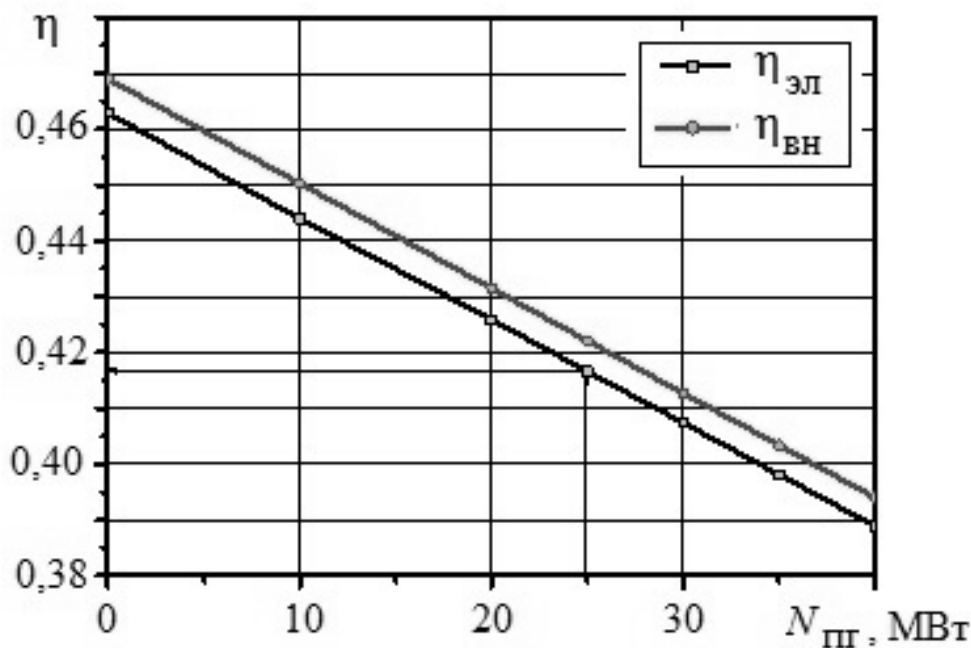


Рис. 4. Зависимость электрического и внутреннего КПД БПЭ от тепловой мощности парогенератора.

Выводы

1. Рассмотрена принципиальная схема ядерной энергетической установки ГТМГР–ВЭП для совместного производства электроэнергии и водорода.

2. Разработан алгоритм и составлена программа расчета сложного термодинамического цикла ГТМГР–ВЭП с тепловой мощностью реактора 250 МВт для производства электроэнергии и водорода методом высокотемпературного электролиза пара.

3. Выполнены расчеты параметров цикла, мощности и эффективности ГТУ сложного цикла при совместном производстве электроэнергии и водорода. Показано, что в базовом режиме при тепловой мощности парогенератора 25 МВт и температуре пара 800 °С полезная электрическая мощность установки составляет 104,16 МВт, а электрический КПД – 41,7 %. Потребные мощности регенератора, предварительного и промежуточного теплообменников равны 111,33 МВт, 119,47 МВт и 100,06 МВт соответственно.

4. Увеличение мощности парогенератора с 25 МВт до 35 МВт приводит к снижению электрической мощности установки на 5,2 %, при этом ее электрический КПД уменьшается до 39,7 %. При снижении мощности парогенератора до 15 МВт электрическая мощность установки увеличивается на 4,1 %, а электрический КПД возрастает до 43,5 %.

5. Результаты расчёта параметров цикла ГТМГР–ВЭП охватывают возможный диапазон их изменения для тепловой мощности реактора

250 МВт с КПД парогенератора равным 1,0. Для получения более точных результатов потребуются использование более полной математической модели парогенератора, учитывающей особенности процессов теплообмена в зависимости от фазового состояния воды для конкретно выбранной конструктивной схемы парогенератора. Как показывают статистические данные, КПД современных парогенераторов составляет около 90 %.

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. *Schultz K.R.* Use of Modular Helium Reactor for Hydrogen Production / General Atomics Project 04962. – GA-A24428. – 2003.

4. *Халатов А.А., Северин С.Д., Доник Т.В.* Анализ термодинамического цикла ГТУ ядерной модульной энергетической установки с гелиевым реактором // Промышленная теплотехника, – 2015. – Т.37. – №2. – С. 59-66.

5. *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.

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF THE ENERGY CONVERSION UNIT OF NUCLEAR ENERGY PLANT WITH HELIUM REACTOR FOR THE ELECTRICITY AND HYDROGEN PRODUCTION

Khalatov A.A.^{1,2}, Severin S.D.¹, Donyk T.V.^{1,2}

¹ Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2A Zhelyabova str., Kyiv, 03680, Ukraine,

² National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», #37 Prospect Peremohy, Kyiv, 03056, Ukraine

The paper provides an analysis of the thermodynamic cycle of the energy conversion unit of the fourth generation modular nuclear power plant, based on the high-temperature helium reactor of 250 MWt thermal power for combined electricity and hydrogen production. This GTMHR–HTSE power plant has contours of the electricity, heat, and superheated water steam production. The circuit of the electricity and heat production includes the nuclear helium reactor and power conversion unit. The energy conversion unit consists of the low and high pressure compressors and upright helium turbine, connected with compressor shaft, preliminary and intermediate heat exchangers, thermal and electrical generators. The energy source in the cycle of the electricity and superheated water steam production is a modular helium reactor.

Specific feature of the GTMGR–VEP power plant is the individual helium loop including the water steam generator. The superheated water steam of the required thermodynamic parameters is directed to the high-temperature electrolysis unit using solid oxide electrochemical cells, in which the water is decomposed into the hydrogen and oxygen, followed by separation of the reactants. The electricity required for the high-temperature water steam electrolysis operation is supplied from the electrical generator of energy conversion unit.

The cycle analysis in the mode of electricity and superheated water steam production has shown that at the steam generator of 25 MWt thermal power and steam temperature of 800 °C the power plant electrical power is 104.16 MWt, while the electrical efficiency is 41.7 %. The power demand of the

thermal regenerator, preliminary and intermediate heat exchangers is 111.33 MWt, 119.47 MWt and 100.06 MWt, respectively. The results of the GTMGR–VEP power plant cycle calculations cover the possible range of their variations for the basic power of the helium nuclear reactor with the water steam generator efficiency of 1.0.

The analysis was performed providing influence of the water steam generator parameters on the cycle efficiency results. Increase in the water steam generator thermal power from 25 MWt to 35 MWt leads to the reduction of electric power by 5.2 %, while the electrical efficiency decreases to 39.7 %. If the water steam generator thermal power drops down to 15 MWt, then the electrical power plant is elevated by 4.1 %, while the electrical efficiency grows up to 43.5 %.

Key words: gas cooled nuclear power plant, high temperature helium reactor, gas turbine plant of the complex thermodynamic Brayton cycle, cycle thermodynamic efficiency, hydrogen production.

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. *Schultz K.R.* Use of Modular Helium Reactor for Hydrogen Production / General Atomics Project 04962. – GA-A24428. – 2003.

4. *Khalatov A.A., Severin S.D., Donyk T.V.* Analysis of thermodynamic cycle of gas turbine plant of nuclear modular installation with helium reactor // *Promyishlennaya teplotekhnika*, – 2015. – Т.37. – №2. – P. 59-66.

5. *Arsenev L.V., Tyiryishkin V.G., Bogov I.A. and other.* *Statsionarnyye gazoturbinnyye ustanovki* // Pod red. L.V. Arseneva, V.G. Tyiryishkina – L.: Mashinostroenie, Leningradskoe otdeleniye, 1989. – 543 p.

Получено 10.08.2015

Received 10.08.2015