

УДК 621.039.5; 621.438

А. А. ХАЛАТОВ^{1,2}, С. Д. СЕВЕРИН¹, Т. В. ДОНИК^{1,2}¹ *Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев*² *Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина*

ВЛИЯНИЕ ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ В РЕГЕНЕРАТОРЕ ТЕПЛОТЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ЦИКЛА МОДУЛЬНОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ГЕЛИЕВЫМ РЕАКТОРОМ

Выполнен расчет термодинамического цикла блока преобразования энергии модульной ядерной энергетической установки с газоохлаждаемым гелиевым реактором тепловой мощностью 250 МВт в режиме выработки электроэнергии и в комбинированном режиме с выработкой тепловой энергии для коммунального теплоснабжения. 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. В работе представлен анализ влияния потерь давления в регенераторе теплоты на эффективность цикла ядерной энергетической установки.

Ключевые слова: модульная ядерная энергетическая установка, газоохлаждаемый гелиевый реактор, газотурбинная установка, сложный термодинамический цикл, эффективность цикла.

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. Кроме того, используемые в атомной энергетике Украины водо-водяные энергетические реакторы (ВВЭР) имеют низкие показатели безопасности. На смену им в недалёком будущем могут прийти новые модульные ядерные энергетические установки (ЯЭУ) четвертого поколения, которые характеризуются высокими экономическими показателями и эксплуатационной надежностью, а также высоким уровнем безопасности за счет совершенствования активных, введения пассивных защитных и локализирующих систем, а также реализации концепции внутренней безопасности [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 – 3]. Преобразование энергии нагретого гелия в механическую и далее в электрическую энергию осуществляется в блоке преобразования энергии (БПЭ), который

представляет собой газотурбинную установку (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. Эта концепция легла в основу международного проекта «Газовая турбина – модульный гелиевый реактор» – ГТ-МГР» [1].

В настоящее время для энергосистемы Украины наиболее перспективными представляются ядерные энергетические установки относительно небольшой тепловой мощности 200 ÷ 300 МВт, которые могут быть использованы как в качестве региональных энергетических установок, так и в составе более крупных энергоблоков большой мощности. С помощью таких энергоустановок размещение генерирующих мощностей на территории Украины можно выполнить наиболее оптимальным образом. Однако в открытой литературе имеются данные по разрабатываемым энергетическим установкам типа ГТ-МГР тепловой мощностью только 100 МВт [4]. Поэтому *целью настоящей работы* является определение параметров термодинамического цикла БПЭ ГТ-МГР тепловой мощностью реактора 250 МВт в режиме выработки электроэнергии и в комбинированном режиме совместного производст-

ва электроэнергии и теплоты для нужд коммунального теплоснабжения, а также исследование влияния потерь давления в регенераторе 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), в основе концепции которого лежит использование активной зоны со сферическими топливными элементами диаметром около 0,2 мм с многослойным керамическим покрытием, графитовыми замедлителями и гелием в качестве теплоносителя. Второй модуль – блок преобразования энергии (БПЭ), состоящий из компрессоров низкого и высокого давления, гелиевой турбины, находящейся на одном валу с компрессорами низкого и высокого давления, регенератора, предварительного и промежуточного теплообменников и генератора переменного тока, приводимого в действие газовой турбиной.

Энергоустановка может эксплуатироваться в двух режимах: в режиме производства электроэнергии, и в комбинированном режиме производства электроэнергии и теплоты для нужд коммунального теплоснабжения.

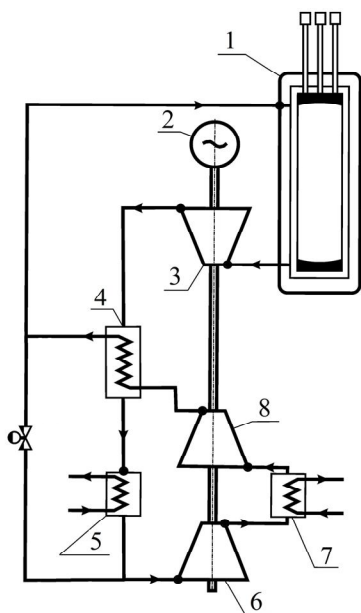


Рис. 1. Схема ГТ-МГР:

- 1 – реактор; 2 – генератор; 3 – турбина;
- 4 – регенератор; 5 – предварительный теплообменник;
- 6 – компрессор низкого давления;
- 7 – промежуточный теплообменник;
- 8 – компрессор высокого давления

При работе установки в комбинированном режиме теплота к теплоносителю отводится в сетевых теплообменниках. В режиме производства электроэнергии сетевой контур отключен и «сбросная» теплота отводится в окружающую среду в градирнях.

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). Использование сложного цикла для БПЭ ГТ-МГР при наличии всех технологических проблем, связанных с его практической реализацией, является необходимым условием достижения высокой эффективности ГТУ при сравнительно низких значениях максимальной температуры цикла, которая составляет 850...900° С.

В настоящей работе создана математическая модель сложного цикла ГТУ, которая включает в себя последовательный расчет параметров цикла для режима выработки электроэнергии и комбинированного режима. Тестирование математической модели производилось на основе сравнения с имеющимися в литературе данными по гелиевому реактору МГР-100ГТ электрической мощностью 100 МВт [4]. 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%.

2. Полученные результаты и их анализ

Расчетное исследование выполнено 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 в диапазоне температуры 273...1500°С: удельная теплоемкость при постоянном давлении – $c_p=5193$ Дж/кг·К; удельная теплоемкость при постоянном объеме – $c_v=3116$ Дж/кг·К; показатель адиабаты – $k=1,6667$, газовая постоянная – $R=2077,22$ Дж/кг К. Для расчётов цикла было использовано уравнение состояния гелия в следующем виде:

$$Pv = RT + Pv(T), \quad (1)$$

где P – давление газа, Па, v – удельный объем газа, $\text{м}^3/\text{кг}$; $B(T) = C_1 + \frac{C_2}{1 - C_3 T} + \frac{C_4}{1 + C_5 T}$

$$C_1 = 9,489433 \cdot 10^{-4} (\text{м}^3/\text{кг});$$

$$C_2 = 9,528079 \cdot 10^{-4} (\text{м}^3/\text{кг});$$

$$C_3 = 3,420680 \cdot 10^{-2} (\text{K}^{-1});$$

$$C_4 = 2,739470 \cdot 10^{-3} (\text{м}^3/\text{кг});$$

$$C_5 = 9,409120 \cdot 10^{-4} (\text{K}^{-1}).$$

Для режима выработки электроэнергии степень регенерации цикла и температурный коэффициент промежуточного охлаждения были приняты равными 0,83 и 1,0, соответственно, для комбинированного режима работы – 0,83 и 1,04. КПД турбины η_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 и для комбинированного режима работы ГТУ представлены в таблице 1, а рассчитанные термодинамические диаграммы цикла показаны на рис. 2.

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 теплообменник – 132,74 МВт; промежуточный теплообменник – 111,18 МВт.

Эффективность рассматриваемого термодинамического цикла характеризуется электрическим КПД ГТУ, который представляет собой отношение электрической мощности цикла $N_{эл}$ к тепловой мощности реактора Q_p [5]:

$$\eta_{эл} = \frac{N_{эл}}{Q_p}, \quad (2)$$

и электрической мощностью цикла

$$N_{эл} = G_T I_{ц} \eta_T, \quad (3)$$

где G_T – расход гелия, кг/с; $I_{ц}$ – удельная работа цикла, Дж/кг, η_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 базового (расчетного) режима выработки элек-

троэнергии были заданы значения относительных потерь давления в магистралях теплообменников, соответствующие достигнутому уровню потерь в современных компактных теплообменниках – 3,0% [6].

Таблица 1

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 гелия 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	Коэффициент полезной работы цикла	50,7	30,5

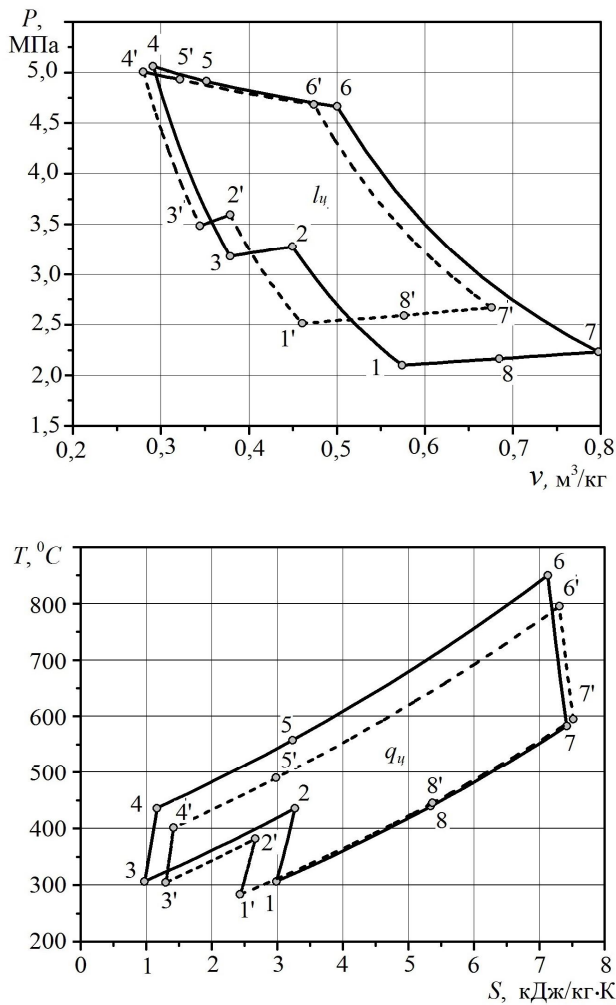


Рис. 2. P-v и T-S диаграммы цикла ГТУ с тепловой мощностью реактора 250 МВт: сплошная линия – режим выработки электроэнергии; пунктирная линия – комбинированный режим

Для ГТ-МГР широкое применение получили высокоэффективные пластинчато-ребристые теплообменники с использованием теплообменных секций с прямоугольным разрезным оребрением. На практике достижение заданных в настоящем исследовании максимальных значений тепловой и гидравлической эффективности (минимальных относительных потерь давления) теплообменного оборудования является технологически сложной и, часто – экономически затратной задачей. Поэтому далее рассмотрено влияние величины относительных потерь давления в горячей, холодной магистрали регенератора и горячих магистралях предварительного и промежуточного теплообменников при их отклонении от расчётных значений на электрический КПД и мощность термодинамического цикла БПЭ ГТ-МГР.

На рис. 3 а, б представлены зависимости электрического КПД и электрической мощности ГТУ от относительных потерь давления в горячей и холод-

ной магистрали регенератора для базового (расчетного) режима выработки электроэнергии.

Данные зависимости позволяют определить электрический КПД и электрическую мощность ГТУ при заданных значениях относительных потерь давления в горячей и холодной магистралях регенератора. 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 2,0%. При увеличении относительных потерь давления в холодной магистрали от расчетного значения 3,0% до 5,0% электрический КПД и мощность при фиксировании значения $\xi_{рек}^Г = 3,0\%$ снижается от 46,4% до 45,3%, и от 115,7 до 113,2 МВт соответственно.

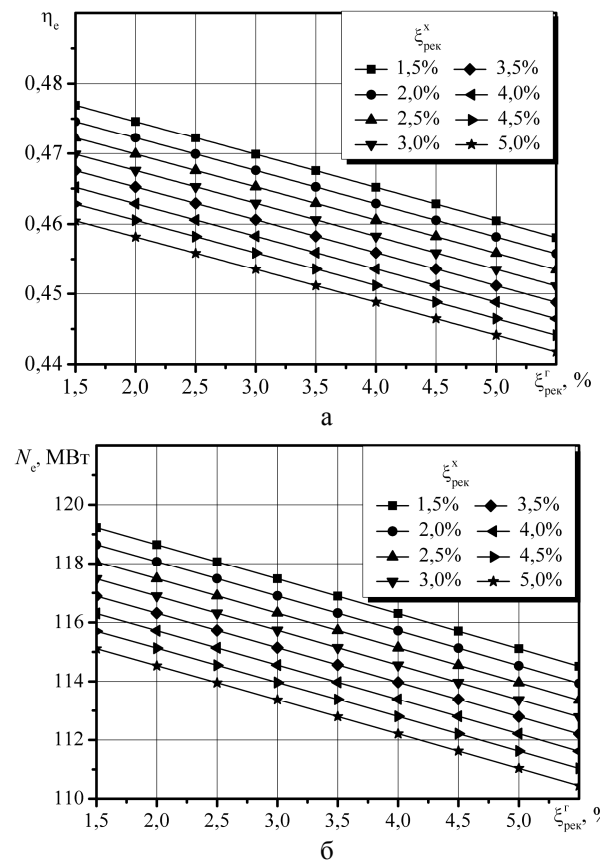


Рис. 3. Зависимость электрического КПД (а) и электрической мощности (б) ГТУ от относительных потерь давления в горячей и холодной магистрали регенератора

Уровень потерь давления в горячих магистралях предварительного и промежуточного теплообменников также оказывает влияние на эффективность и мощность ГТУ. На рис. 4 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 маги-

стралях предварительного и промежуточного теплообменников приводит к снижению электрического КПД и мощности установки примерно на 2,0%.

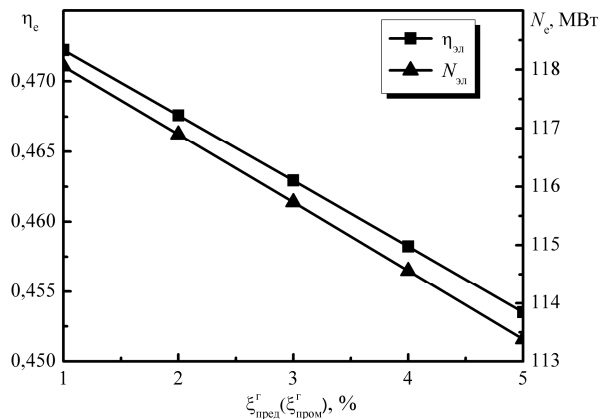


Рис. 4. Зависимость электрического КПД и электрической мощности ГТУ от относительных потерь давления в горячей магистрали предварительного и промежуточного теплообменников

Таким образом, при увеличении относительных гидравлических потерь в теплообменном оборудовании блока преобразования энергии хотя бы на 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 газохлаждаемого гелиевого реактора четвертого поколения тепловой мощностью 250 МВт при его работе в режиме выработки электроэнергии и в комбинированном режиме с выработкой тепловой энергии для коммунального теплоснабжения.

2. При работе в режиме выработки электроэнергии полезная электрическая мощность установки составляет 115,73 МВт с электрическим КПД 46,3%. В комбинированном режиме электрическая мощность составляет 69,66 МВт с электрическим КПД 27,86%. При этом полезная тепловая мощность установки для использования в коммунальном

теплоснабжении составляет 182,13 МВт.

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 2,0%. Увеличение относительных потерь в предварительном и промежуточном теплообменниках от 3,0 до 5,0% приводит к снижению электрического КПД от 46,4% до 45,4% и электрической мощности — от 115,73 до 113,8 МВт.

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

Литература

1. Zgliczynski, J. B. *The Gas Turbine-Modular Helium Reactor (GT-MHR) High Efficiency [Electronic resource]* / J. B. Zgliczynski, F. A. Silady, A. J. Neylan // *Cost Competitive, Nuclear Energy for the Next Century*. — 1994. — GA-A21610. General Atomics. — Access mode: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/25/074/25074207.pdf. — 20.04.2015.
2. *Status of the GT-MHR for Electricity Production [Text]* / 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. Wright, S. A. *Concept Design for a High Temperature Helium Brayton Cycle with Interstage Heating and Cooling [Text]* / S. A. Wright, M. E. Vernon, P. S. Pickard // *SANDIA REPORT, 2006*. — SAND 2006-4147. — 91 p.
4. *Применение высокотемпературных модульных гелиевых реакторов для теплоснабжения энергоёмких производств [Текст]* / А. Я. Столяревский [и др.] // *Новости теплоснабжения*. — 2011. — № 2. — С. 39-43.
5. *Стационарные газотурбинные установки [Текст]* / Л. В. Арсеньев [и др.] ; под ред. Л. В. Арсеньева, В. Г. Тырышкина. — Ленинград : Машиностроение, Ленинградское отд., 1989. — 543 с.
6. Чичиндаев, А. В. *Оптимизация компактных пластинчато-ребристых теплообменников. Часть I. Теоретические основы [Текст] : учебное пособие* / А. В. Чичиндаев. — Новосибирск : Издательство НГТУ, 2003. — 400 с.

**ВПЛИВ ВТРАТ ТИСКУ В РЕГЕНЕРАТОРІ ТЕПЛОТИ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ
ТЕРМОДИНАМІЧНОГО ЦИКЛУ МОДУЛЬНОЇ ЯДЕРНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ
З ГЕЛІЄВИМ РЕАКТОРОМ**

А. А. Халатов, С. Д. Северин, Т. В. Доник

Виконано розрахунок термодинамічного циклу блоку перетворення енергії модульної ядерної енергетичної установки з газоохолоджувальним гелієвим реактором тепловою потужністю 250 МВт в режимі вироблення електроенергії та в комбінованому режимі з виробленням теплової енергії для комунального тепlopостачання. Розглянута енергетична установка працює по складному термодинамічному циклу ГТУ, який являє собою замкнутий цикл Брайтона з регенерацією теплоти і проміжним охолодженням робочого тіла в компресорі. В роботі представлено аналіз впливу втрат тиску в регенераторі теплоти на ефективність циклу ядерної енергетичної установки.

Ключові слова: модульна ядерна енергетична установка, газоохолоджувальний гелієвий реактор, газотурбінна установка, складний термодинамічний цикл, ефективність циклу.

**INFLUENCE PRESSURE LOSS IN THE REGENERATOR HEAT ON EFFICIENCY
THERMODYNAMIC CYCLE MODULAR NUCLEAR POWER PLANT
WITH HELIUM REACTOR**

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

The calculation of the thermodynamic cycle energy conversion unit modular nuclear power plant with a gas-cooled reactor helium thermal capacity of 250 MW in the mode of power generation in combined mode with production of thermal energy for district heating. The considered power plant operates on the complex thermodynamic cycle gas turbine, which is a closed Brayton cycle with regeneration and intercooling heat the working fluid in the compressor. The paper presents an analysis of the impact of the relative loss of pressure in the regenerator heat on the efficiency of a nuclear power plant.

Key words: modular nuclear power plant, gas-cooled helium reactions Tor, gas turbine, complex thermodynamic cycle efficiency of the cycle.

Халатов Артем Артемович – д-р техн. наук, проф., заведуючий відделом високотемпературної термогазодинамики, Інститут технічної теплофізики НАН України, заведуючий кафедрою фізика енергетических систем, Національний технічний університет України «КПІ», Київ, Україна, e-mail: artem.khalatov@vortex.org.ua.

Северин Сергей Дмитриевич – канд. техн. наук, старший научний співробітник віддела високотемпературної термогазодинамики, Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, Україна, e-mail: severin962@gmail.com.

Доник Татьяна Васильевна – канд. техн. наук, научний співробітник віддела високотемпературної термогазодинамики, Інститут технічної теплофізики НАН України, асистент кафедри фізика енергетических систем, Національний технічний університет України «КПІ» Київ, Україна, e-mail: doniktv@ukr.net.