

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ) (2.4.5)

УДК 621.311.22

DOI: 10.24160/1993-6982-2023-5-48-63

## Характеристики гибридных солнечных комбинированных микрогазотурбинных установок при работе на частичных нагрузках

А.В. Дологонян, В.Т. Матвеенко, А.Г. Клименко

Работа гибридных солнечных энергетических установок, в зависимости от условий эксплуатации, в большинстве своем проходит на частичных нагрузках, поэтому необходимо оценить их характеристики и топливную экономичность при переменных режимах работы. Предметом анализа является исследование влияния схем газотурбинных двигателей на топливную эффективность гибридных солнечных комбинированных микрогазотурбинных установок (МГТУ) при работе на частичных нагрузках при генераторном режиме нагружения.

Установлено, что снижение нагрузки гибридной солнечной комбинированной МГТУ, в отличие от обычной, в солнечное время приводит к росту ее эффективности для любой схемы при площадях апертуры фокусирующего солнечного коллектора больше пороговых. Проведенные опыты показали, что относительный коэффициент использования топлива на долевых нагрузках гибридных солнечных комбинированных МГТУ в большей степени зависит от схемы базового микрогазотурбинного двигателя и установки органического цикла Ренкина (ОЦР), чем от рода рабочего тела ОЦР.

**Ключевые слова:** микрогазотурбинная установка, микротурбина, регенерация теплоты, фокусирующий солнечный коллектор, турбокомпрессорный утилизатор, частичные нагрузки, органический цикл Ренкина, рабочее тело.

**Для цитирования:** Дологонян А.В., Матвеенко В.Т., Клименко А.Г. Характеристики гибридных солнечных комбинированных микрогазотурбинных установок при работе на частичных нагрузках // Вестник МЭИ. 2023. № 5. С. 48—63. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-5-48-63.

## The Characteristics of Hybrid Solar Micro Gas-Turbine Power Plants Operating at Partial Loads

A.V. Dologlonyan, V.T. Matveenko, A.G. Klimenko

Hybrid solar power plants are often operated at partial loads, depending on the operating conditions. Therefore, it is necessary to evaluate their characteristics and fuel utilization efficiency in variable operation modes. The article presents a study of the effect the gas turbine engine configurations have on the fuel efficiency of hybrid solar micro gas-turbine plants (MGTP) during operation at partial loads in a generator loading mode. It has been found that a decrease in the load of a hybrid solar MGTP in the sunlight time results, unlike the usual one, in a growth of its efficiency for any scheme with the focusing solar collector aperture areas larger than their threshold values. The accomplished experiments have shown that the relative fuel utilization factor at partial loads of hybrid solar MGTPs depends to a larger extent on the configuration of the basic micro gas-turbine engine and the Rankine organic cycle (ORC) unit than on the type of ORC working fluid.

**Key words:** micro gas-turbine plant, microturbine, heat recovery, focusing solar collector, turbocharger utilizer, partial loads, Rankine organic cycle, working fluid.

**For citation:** Dologlonyan A.V., Matveenko V.T., Klimenko A.G. Possible Ways of Developing Mongolia's Electric Power System. Bulletin of MPEI. 2023;5:48—63. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2023-5-48-63.

## Введение

Гибридные солнечные комбинированные микрогазотурбинные установки, в сравнении с установками на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ), имеют следующие преимущества:

- обеспечивают устойчивое и постоянное снабжение объекта энергией требуемого качества в необходимом количестве;
- не требуют аккумулирования энергии, вырабатываемой ВИЭ;
- комбинируют выработку тепловой и электрической энергии (если это возможно);
- обладают способностью гибкого регулирования рабочего процесса микрогазотурбинных двигателей (МГТД) за счет перераспределения потоков энергии внутри цикла (с помощью регулируемого соплового аппарата или байпасирования циклового воздуха мимо регенератора (при его наличии)) для изменения соотношения выходной теплой и электрической энергии в зависимости от потребностей локального объекта (потребителя);
- повышают экономичность базовой установки за счет использования ВИЭ;
- имеют более низкую удельную стоимость по сравнению с ВИЭ.

В [1, 2] установлено, что включение фокусирующего солнечного коллектора (ФСК) в состав микрогазотурбинных двигателей гарантирует повышение среднегодового коэффициента использования топлива на 10...12% в зависимости от климатических условий (от умеренных до тропических), а добавление установки органического цикла Ренкина — на 8...12% в зависимости от схемы базового МГТД.

Поскольку работа гибридных солнечных энергетических установок часто осуществляется на частичных нагрузках в зависимости от условий эксплуатации, то необходимо оценить их топливную экономичность. В настоящей работе рассмотрен генераторный режим работы гибридных солнечных комбинированных МГТУ на частичных нагрузках.

## Базовые схемы газотурбинных двигателей, работающих на органическом топливе

Микрогазотурбинные двигатели (МГТД) служат для энергообеспечения локальных объектов: как стационарных, технологических, так и транспортных подводных и надводных. За основу базовой схемы МГТД принят ГТД простого цикла (рис. 1), усложняемый с целью увеличения КПД. ГТД простого цикла является одновальным с блокированной турбиной для привода электрогенератора.

Усложнение ГТД простого цикла (ПЦ) выполняется за счет:

- регенерации теплоты выхлопных газов в рабочем цикле двигателя;

- применения турбины перерасширения рабочего тела за силовой турбиной [2] с целью повышения мощности ГТД;

- использования комбинации предыдущих методов.

На рисунке 2 изображена схема газотурбинной установки ПЦ с регенерацией Р теплоты ПЦ+Р, в которую (по отношению к схеме ГТУ простого цикла) добавлен теплообменник-регенератор для подогрева рабочего тела перед камерой сгорания за счет теплоты выхлопных газов двигателя, позволяющий повысить КПД самого двигателя.

На рисунке 3 дана схема МГТУ с турбокомпрессорным утилизатором (ТКУ). Турбина перерасширения

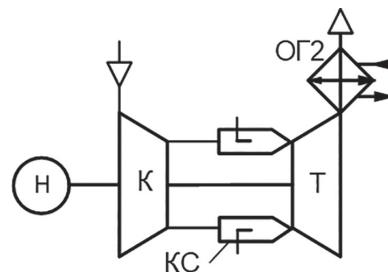


Рис. 1. Схема когенерационной МГТУ ПЦ:

К — компрессор; КС — камера сгорания; Т — турбина; ОГ2 — охладитель газов; Н — нагрузка

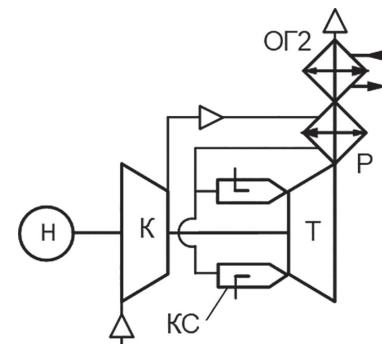


Рис. 2. Схема когенерационной МГТУ ПЦ+Р:

Р — регенератор; остальные обозначения — те же, что на рис. 1

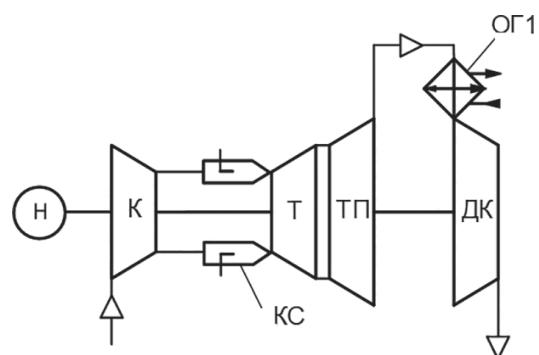


Рис. 3. Схема когенерационной МГТУ ПЦ+ТКУ:

ТП — турбина; ОГ1 — охладитель газов; ДК — дожимающий компрессор; остальные обозначения — те же, что на рис. 1

ТП, приводящая дожимающий компрессор ДК с охладителем газа ОГ1 между ними (выполняет роль котла-утилизатора), образует турбокомпрессорный утилизатор. Посредством использования в рабочем цикле перерасширения рабочих газов за силовой турбиной увеличивается мощность двигателя при том же расходе топлива и, следовательно, повышается КПД двигателя.

В г. Севастополе создан опытный газотурбогенератор с ТКУ (рис. 4). В опытной когенерационной установке использован газотурбогенератор АИ-8. ГТД выполнен по схеме со свободными силовой турбиной (рис. 5) и ТКУ. Охлаждение газа проходило в теплообменниках: первый — для высокотемпературного теплоносителя или регенератора, второй — для получения горячей воды. Полный спектр испытаний газотурбогенератора с ТКУ на номинальной и частичных нагрузках подтвердил достоверность теоретических разработок по турбокомпрессорной утилизации теплоты с применением турбины перерасширения. Установка обеспечивает рост КПД по сравнению с простым циклом примерно в 1,2 раза.

Повышение КПД МГТД возможно также за счет глубокой утилизации теплоты выхлопных газов двигателя с превращением части ее в механическую работу. Такая задача решается за счет комбинации двух способов повышения экономичности МГТД, а именно, за силовой турбиной МГТД следует установить турбокомпрессорный утилизатор, а регенератор встроить между турбиной перерасширения и дожимающим компрессором. На рисунке 6 представлена схема МГТД с ТКУ и регенерацией теплоты. Охладитель газа ОГ1 обеспечивает понижение температуры газа перед ДК с целью снижения в нем работы сжатия. Охладитель ОГ1 также выполняет функции котла-утилизатора для обеспечения локального объекта теплотой.

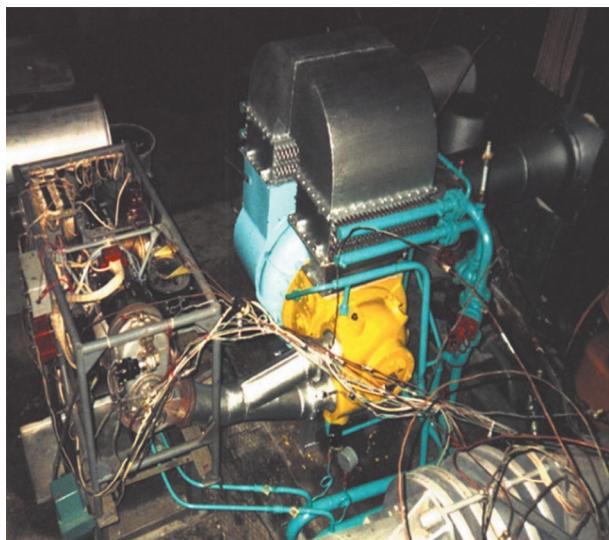


Рис. 4. Когенерационный газотурбогенератор с ТКУ максимальной электрической мощностью 60 кВт

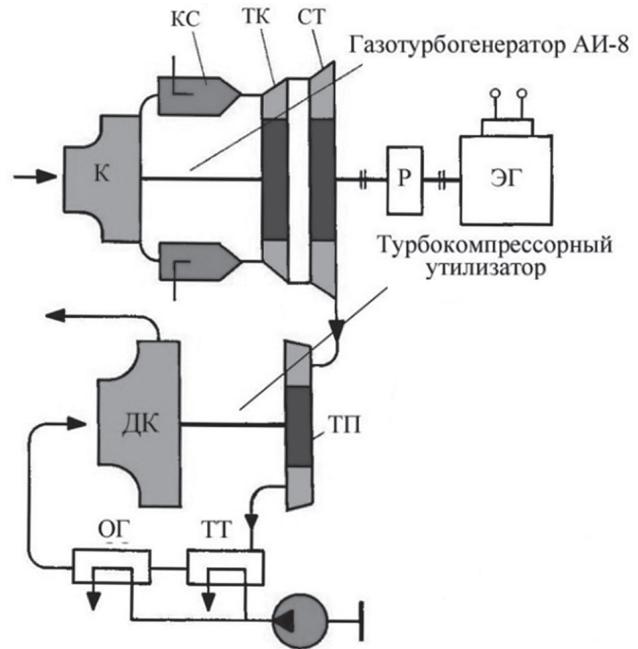


Рис. 5. Схема когенерационного ГТД с ТКУ:

К — компрессор; КС — камера сгорания; ТК — турбина компрессора; СТ — силовая турбина; Р — редуктор; ЭГ — электрогенератор; ДК — дожимающий компрессор; ТП — турбина перерасширения; ТТ — теплофикационный теплообменник; ОГ — охладитель газа

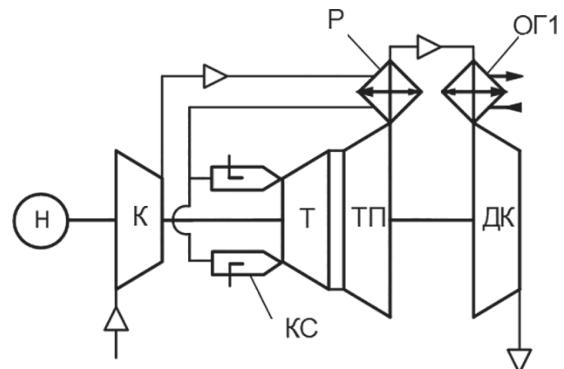


Рис. 4. Схема когенерационной МГТУ ПЦ+ТКУ+Р: обозначения — те же, что на рис. 1 — 3

#### Методика и результаты исследования характеристик усложненных газотурбинных двигателей на номинальном режиме

Исследование характеристик рабочих циклов МГТД при работе на номинальном режиме выполнено с помощью физико-математических моделей и программного обеспечения, ранее опробованного при анализе параметров в ГТУ, приведенных в [3], где для моделирования была использована среда Microsoft Excel с макросом, написанным на Visual Basic++. Математическая модель мало отличается от общепринятых, кроме того, что схемы ГТД с турбокомпрессорным утилизатором рассматриваются как тандем двух

двигателей. В настоящей статье в качестве программной среды взят пакет компьютерной алгебры Wolfram Mathematica. Использованная методика калибровалась на существующих ГТД, и расхождение в определении параметров не превысило 0,1%.

В настоящее время в микрогазотурбинной технике достигнуты значительные успехи в области повышения эффективности ее элементов [4, 5]. В микрогазотурбинных установках необходимо учитывать конструктивные факторы, влияющие на аэродинамические характеристики компрессоров и турбин [4 — 7]. Так, КПД компрессора находится в пределах 82...86%, охлаждаемой турбинной ступени  $\eta_r = 84...86\%$ , неохлаждаемой турбины достигает 88...90% при  $\pi_k = 2...6$ . Начальная температура газа Т3 в микротурбине имеет значение от 1173 до 1373 К, при этом турбинная ступень высокого давления может быть неохлаждаемой. Для МГТД характерно наличие теплообменных аппаратов, обеспечивающих требуемые параметры рабочего тела в цикле, но при этом имеющих оптимальные потери давления и, соответственно, габаритные размеры для микротурбинных установок. При применении регенератора, габариты которого существенно зависят от конструкции теплообменной матрицы, ее плотности и площади поверхности теплопередачи, для микротурбины оптимальная степень регенерации зависит от гидравлического сопротивления регенератора и давления рабочей среды по каждой из теплообменяющихся сторон [8].

Для моделирования установок, изображенных на рис. 1 — 3, 6, приняты следующие исходные данные.

#### Исходные параметры МГТД

Адиабатный КПД:

турбины.....	0,88
компрессора.....	0,80
турбины перерасширения <sup>1</sup> .....	0,90
дожимающего компрессора <sup>2</sup> .....	0,88
КПД:	
камеры сгорания .....	0,97
электрогенератора.....	0,96
Плотность матрицы регенератора, м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup> .....	164

#### Параметры базовых МГТУ на номинальном режиме

Наименование параметра	ПЦ	ПЦ+Р	ПЦ+ТКУ	ПЦ+ТКУ+Р
Эффективный КПД МГТУ, %	29,2	35,4	35,6	37,4
Температура газов на выходе из турбины, К	759	961	610	865
Температура газов на входе в парогенератор, К	759	597	610	580
Оптимальная степень повышения давления в компрессоре	21	6,4	14,4	5,3
Оптимальная степень повышения давления в ДК	—	—	3,5	1,8
Оптимальная степень регенерации	—	0,875	—	0,83
Удельная мощность на валу силовой турбины, кВт/кг	219	187	308	244
Удельная тепловая мощность, кВт/кг	451	280	300	263
КПД теплотехнический, %	88	85	70	76

Коэффициент восстановления давления в регенеративном теплообменнике со стороны газа:

$$\text{для ПЦ+Р}^3 \dots \varepsilon_r = \left(1 + c_r \frac{r}{1-r}\right)^{-1}$$

$$\text{для ПЦ+ТКУ+Р}^3 \dots \varepsilon_r = \frac{1}{2c_r \varepsilon_{\text{ор1}}^2 \pi_{\text{дк}}^2} \frac{1-r}{r} \left( \sqrt{1 + 4c_r \varepsilon_{\text{ор1}}^2 \pi_{\text{дк}}^2 \frac{r}{1-r}} - 1 \right)$$

$$\text{со стороны воздуха}^3 \dots \varepsilon_b = 1 - c_b \frac{r}{1-r}$$

Коэффициент восстановления давления:

на входе в установку  $\varepsilon_{\text{вх}} \dots 0,97$

в КС  $\varepsilon_{\text{ко}} \dots 0,97$

на выходе из установки  $\varepsilon_{\text{вых}} \dots 0,97$

на выходе из установки  $\varepsilon_{\text{ор1}}, \varepsilon_{\text{ор2}} \dots 0,96$

Температура газов на выходе из ОГ1 и ОГ2, К ..... 323

Температура окружающего воздуха, К ..... 288

Влажность окружающего воздуха, % ..... 60

П р и м е ч а н и я:

1, 2 — более высокие параметры компрессора и турбины связаны с масштабным эффектом в вакуумном цикле, поскольку давление рабочего тела за турбиной ниже атмосферного примерно в 2 раза, соответственно, во столько же раз размеры компрессора и турбины больше, чем у компрессора и турбины в обычном цикле.

3 — коэффициенты  $c_r$  и  $c_b$  найдены из параметров существующих прототипов [8].

Параметры циклов базовых МГТУ, работающих по схемам, приведенным на рис. 1 — 3, 6, исходных данных и максимальной температуре цикла  $T_3 = 1373$  К даны в табл. 1.

#### Результаты исследования характеристик микрогазотурбинных установок на частичных нагрузках

Анализ характеристик циклов МГТУ на частичных нагрузках производили на генераторном режиме (при постоянном числе оборотов) с блокированной силовой турбиной и свободным ТКУ, согласно методам, предложенным в [10, 11] и опробованным в [12]. Генераторный режим — типичен для подводных и надводных судов с электродвижением, а также других локальных

Таблица 1

объектов. Результаты исследования эффективности  $\eta_e$  базовых МГТУ на частичных нагрузках продемонстрированы на рис. 7, где показана зависимость эффективности МГТД от относительной нагрузки  $\bar{N} = N_{e'}/N_{e0}$  ( $N_{e'}$ ,  $N_{e0}$  — текущая и номинальная механические мощности, полученные в МГТД, кВт). Анализ рис. 7 показывает, что эффективность схем МГТД, данных на рис. 1 — 3, 6 и в табл. 1, распределяется без изменений и на частичных нагрузках. Наибольшую эффективность продемонстрировала схема ПЦ+ТКУ+Р, а наименьшее снижение эффективности при уменьшении нагрузки обеспечила схема ПЦ+ТКУ.

### Солнечный коллектор

Характеристики ФСК изучали с использованием физико-математических моделей, основанных на многочисленных испытаниях и приведенных в [13, 14].

В качестве климатических параметров взяты данные [15] для г. Евпатория (умеренный климат). При моделировании параболоцилиндрического ФСК принятые следующие исходные данные.

### Параметры ФСК

Угол раскрытия.....	$\pi/2$
Размер раскрытия зеркала концентратора, м.....	2
Фокусное расстояние, м .....	0,5
Наружный диаметр абсорбера, мм .....	25,4
Наружный диаметр приемника (вакуумированная трубка, металлическая сильфонная с каждой стороны для достижения необходимого вакуума), мм .....	50
Пропускательная способность прозрачной изоляции .....	0,97
Поглощательная способность абсорбера.....	0,97
Излучательная способность прозрачной изоляции .....	0,86
Излучательная способность	
абсорбера [16].....	$(1,666 \cdot 10^{-4})T + 3,375 \cdot 10^{-3}$
Отражательная способность зеркала .....	0,935
Ошибки поворота и отслеживания .....	0,994
Точность геометрии зеркал коллектора .....	0,980
Замутнение зеркала.....	0,968
Грязь на элементах сбора тепла.....	0,984

Прочие факторы, влияющие на оптические параметры .....	0,960
Ориентация.....	север—юг
Расход теплоносителя, кг/с .....	1
Род теплоносителя .....	воздух

Использование воздуха в качестве теплоносителя обусловлено высокими (700...1200 К) температурами на выходе ФСК, при которых наиболее известные термомасла разлагаются, а другие жидкости закипают. С другой стороны, воздух, как теплоноситель, создает и определенные трудности, связанные с эффективностью ФСК. Уравнение для определения полезной энергии, выработанной ФСК имеет вид [16]:

$$Q_u = F' \eta_0 I A_s - F' U_L (T_f - T_a) A_p, \quad (1)$$

где  $F'$  — коэффициент эффективности приемника;  $\eta_0$  — оптический КПД ФСК;  $I$  — интенсивность прямой солнечной радиации, приходящей на ФСК, Вт/м<sup>2</sup>;  $A_s$  — площадь апертуры ФСК, м<sup>2</sup>;  $U_L$  — коэффициент тепловых потерь приемника, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_f$  — средняя температура теплоносителя, К;  $T_a$  — температура окружающей среды, К;  $A_p$  — площадь поверхности абсорбера, м<sup>2</sup>.

Коэффициент эффективности приемника в (1) определяет эффективность ФСК и любого другого коллектора в целом:

$$F' = 1 \left/ \left( 1 + \frac{U_L}{U_f} \right) \right., \quad (2)$$

где  $U_f$  — коэффициент теплоотдачи от абсорбера к теплоносителю, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Из (2) следует, что при  $U_f \gg U_L$  коэффициент эффективности приемника стремится к единице, а поскольку коэффициент теплоотдачи пропорционален теплопроводности теплоносителя, теплоносители следует выбирать с наиболее высоким ее значением. У воздуха коэффициент теплопроводности очень мал, поэтому, чтобы это компенсировать, необходимо уве-

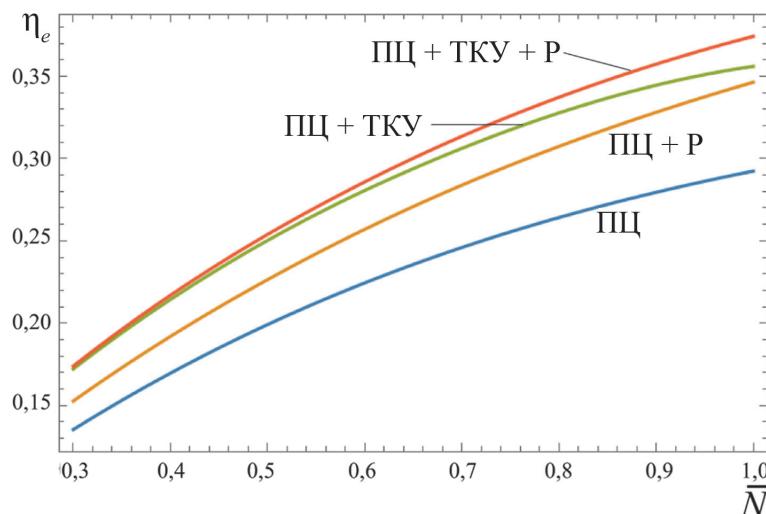


Рис. 7. Зависимости КПД МГТД, изображенных на рис 1 — 3, 6, от относительной нагрузки

личить скорость течения теплоносителя в абсорбере, для чего следует уменьшить его поперечное сечение, что, соответственно, повысит гидравлическое сопротивление ФСК.

Согласно [17], гидравлическое сопротивление цилиндрического канала равно

$$\Delta P = \xi_g \frac{l}{d} \rho \frac{u^2}{2}, \quad (3)$$

где  $\xi_g$  — коэффициент гидравлического сопротивления;  $l, d$  — длина и диаметр канала, м;  $\rho$  — плотность теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>;  $u$  — скорость движения среды, м/с.

С учетом данных [1], зависимость гидравлических потерь от температуры и давления примет вид

$$\Delta P(T, P) = \frac{\xi_g}{8} \frac{RT}{P} \frac{F}{S} \left( \frac{G}{S} \right)^2, \quad (4)$$

где  $S, F$  — площади проходного сечения и поверхности канала, м<sup>2</sup>;  $G$  — расход теплоносителя, кг/с;  $R$  — индивидуальная газовая постоянная, Дж/(кг·К);  $T$  — температура газа, К;  $P$  — давление газа, Па.

Безусловно, коэффициент гидравлических потерь в (4) тоже зависит от температуры, но зависимость эта мала, поскольку для турбулентного режима течения он пропорционален динамическому коэффициенту вязкости ( $\mu \sim T$ ) в степени 0,2 [17], т. е. при изменении температуры газа в два раза он изменится на 15%.

Кроме того, выражение (4) наглядно показывает, что для газа гидравлические потери в канале обратно пропорциональны его давлению.

Таким образом, наибольшее влияние ФСК оказывает на эффективность гибридных солнечных МГТУ с малой степенью повышения давления  $\pi_k$ , обычно это установки, содержащие регенератор.

### Установки органического цикла Ренкина

Для исследования комбинированных установок использовались модели, описанные в [18]. Приняты следующие параметры установок ОЦР.

#### Параметры установок ОЦР

Адиабатный КПД турбины	0,82
КПД насоса	0,78
Коэффициент восстановления давления:	
в парогенераторе	0,92
в конденсаторе	0,96
в регенеративном теплообменнике	0,96

Степень регенерации	0,9
Максимальный температурный напор на выходе:	
из пароперегревателя $\Delta T_1$ , К	50
из испарительного пучка $\Delta T_2$ , К	15
Кратность циркуляции рабочего тела	1

В качестве промежуточного теплоносителя между МГТД и установкой ОЦР принято термальное масло Даутерм, свойства которого даны в [19]. В [20] показано, что наилучшими характеристиками для установок ОЦР обладают рабочие тела, представленные в табл. 2. Свойства рабочих тел взяты из [21].

Для рабочих тел R123 и R1233zd в настоящей работе рассмотрены только регенеративные схемы установок ОЦР, как имеющие наилучшие показатели [20]. Для аммиака и воды, ввиду их термодинамических характеристик, использование регенеративных схем установок ОЦР невозможно.

### Результаты исследования характеристик гибридных солнечных комбинированных микрогазотурбинных установок

Схемы гибридных солнечных комбинированных МГТУ изображены на рис. 8 — 15.

При исследовании гибридных солнечных комбинированных МГТУ относительную влажность (в %) рассчитывали в соответствии данными табл. 1 в зависимости от температуры окружающей среды:

$$\varphi = 100 \cdot (82,866 - 1,4012T + 0,0088565 T^2 - 0,000024585T^3 + 2,528873 \cdot 10^{-8} T^4).$$

Оценить топливную экономичность работы гибридной солнечной комбинированной МГТУ на частичных нагрузках можно с помощью коэффициента использования топлива, представляющего собой отношение работы произведенной МГТУ к теплоте затраченного в цикле органического топлива:

$$\xi_f = \frac{N_{ei}}{Q_{fi}}, \quad (5)$$

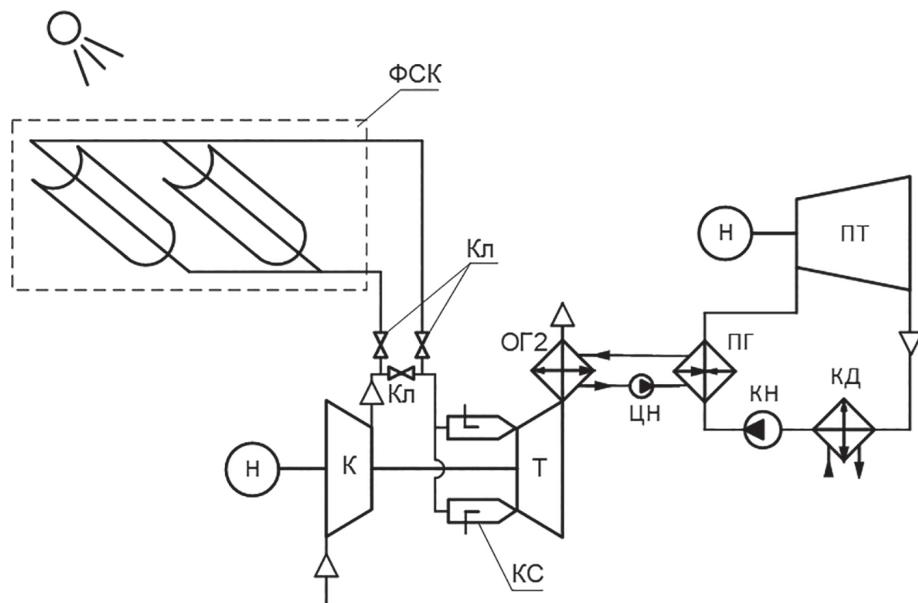
где  $N_{ei}$  — механическая мощность, полученная в МГТД гибридной солнечной комбинированной МГТУ для  $i$ -го солнечного часа, кВт;  $Q_{fi}$  — тепловая мощность, полученная при сгорании топлива в гибридной солнечной комбинированной МГТУ для  $i$ -го солнечного часа, кВт.

Для номинального режима МГТД выражение (5) выглядит следующим образом:

Таблица 2

### Некоторые свойства рабочих тел, использованных в работе

Обозначение рабочего тела	Молекулярный вес	Критическое давление, МПа	Критическая температура, К
R717 (аммиак)	17,030	11,33	405,40
R718 (вода)	18,000	22,06	647,30
R123	152,93	3,660	456,83
R1233zd	130,50	3,570	438,75



ФСК — фокусирующий солнечный коллектор; Кл — переключающиеся клапаны; ПТ — паровая турбина; КД — конденсатор; ЦН — циркуляционный насос; ПГ — парогенератор; остальные обозначения — те же, что на рис. 1

Рис. 9. Схема гибридной солнечной комбинированной МГТУ ПЦ с регенерацией:

$$\xi_{fi} = \frac{\xi_f}{\xi_{f0}}$$

Тогда относительный коэффициент использования топлива представляет собой отношение:

и зависит от относительной нагрузки  $\bar{N}$  и площади апертуры ФСК.

Зависимость относительного коэффициента использования топлива от относительной нагрузки для гибридных солнечных МГТУ, схемы которых приведены в [1, 2], при различных площадях апертуры ФСК изображена на рис. 16 — 19.

Анализ рис. 16 — 19 показал, что при определенных площадях апертуры ФСК эффективность гибрид-

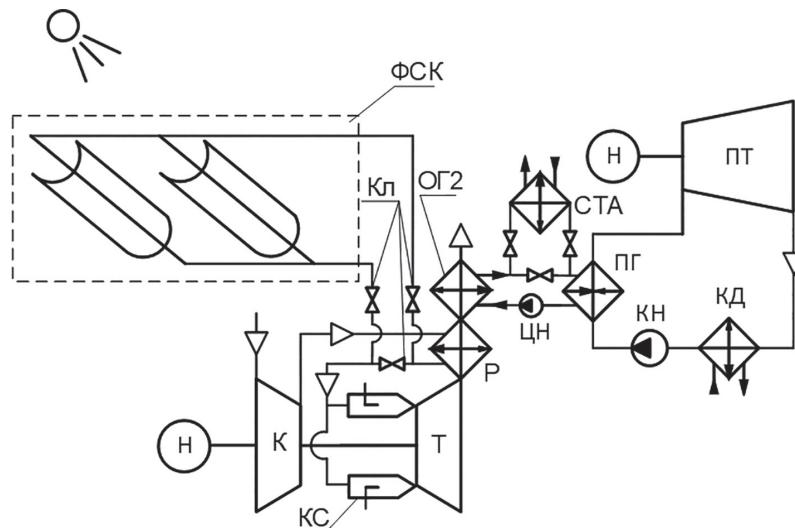


Рис. 10. Схема гибридной солнечной комбинированной МГТУ ПЗ+Р с ОЦР без регенерации:  
СТА — сетевой теплообменный аппарат; остальные обозначения — те же, что на рис. 1, 2, 5

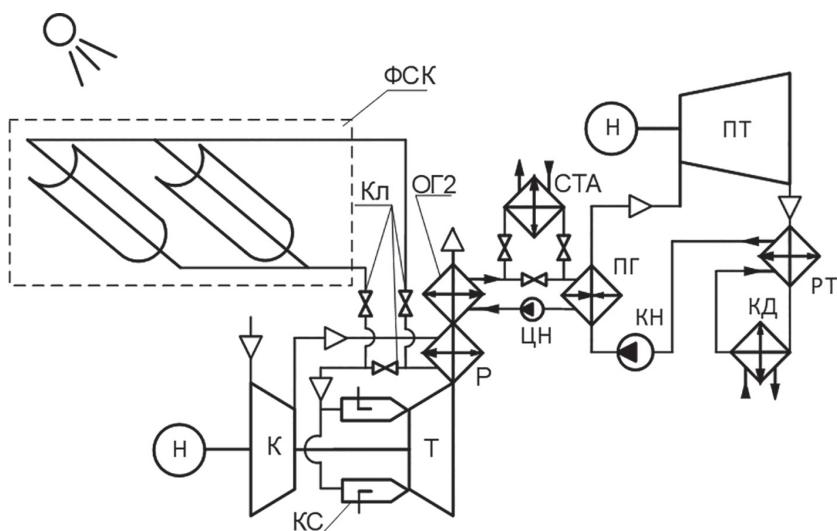


Рис. 11. Схема гибридной солнечной комбинированной МГТУ ПЗ+Р с ОЦР с регенерацией:  
обозначения — те же, что на рис. 1, 2, 7, 8

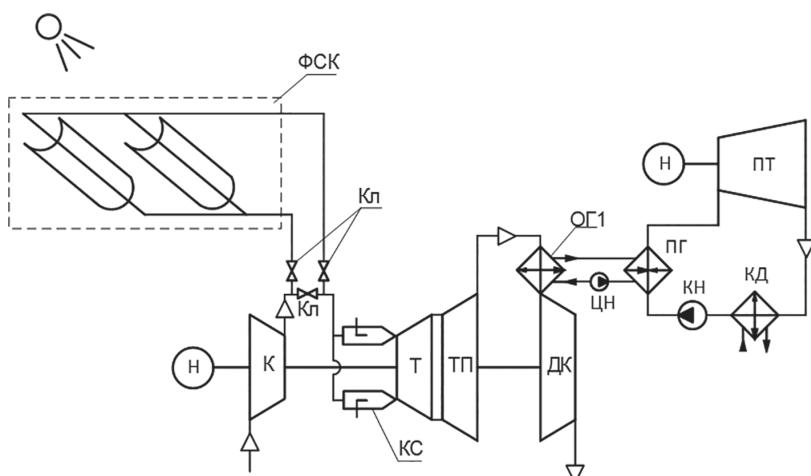


Рис. 12. Схема гибридной солнечной комбинированной МГТУ ПЗ+ТКУ с ОЦР без регенерации:  
обозначения — те же, что на рис. 1, 3, 5

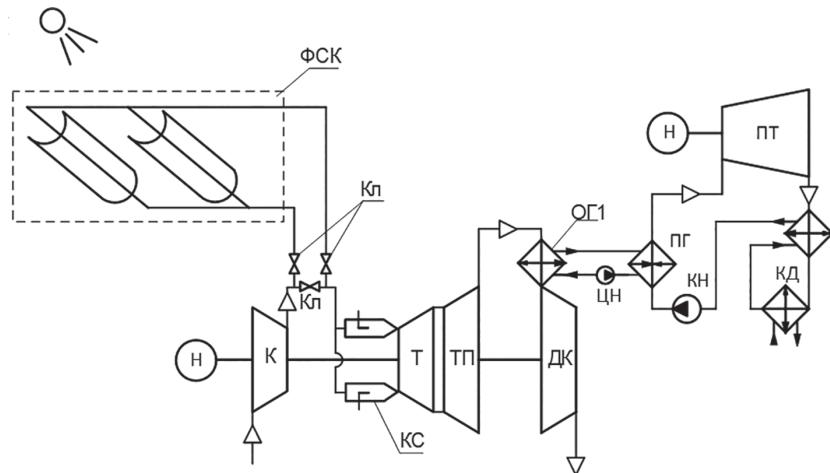


Рис. 13. Схема гибридной солнечной комбинированной МГТУ ПЦ+ТКУ с ОЦР с регенерацией: обозначения — те же, что на рис. 1, 3, 7

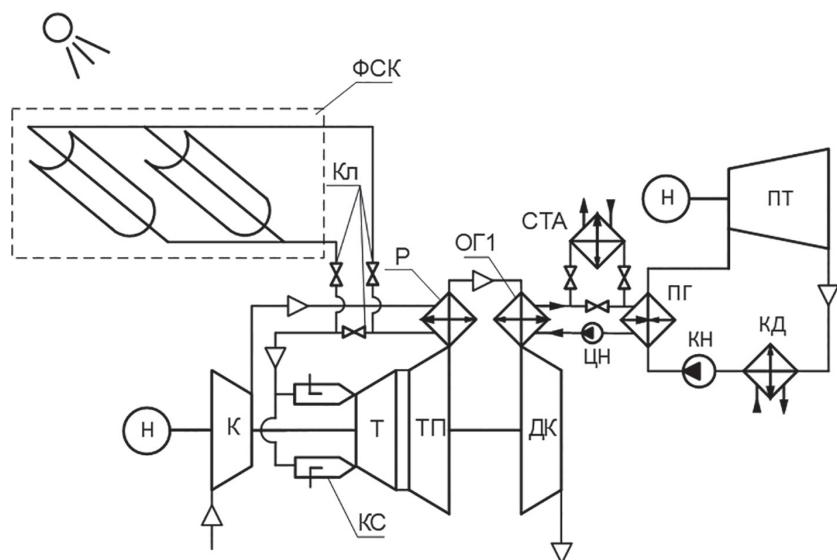


Рис. 14. Схема гибридной солнечной комбинированной МГТУ ПЦ+ТКУ+Р с ОЦР без регенерации: обозначения — те же, что на рис. 1, 4, 5

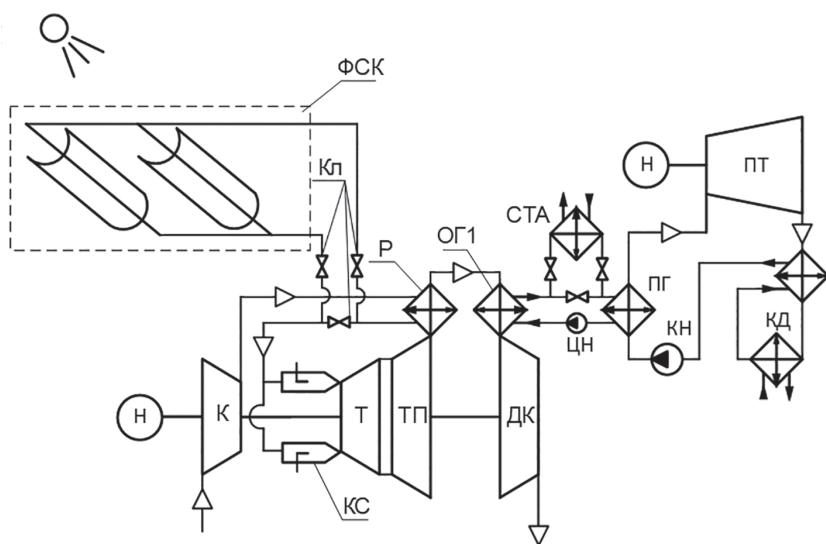


Рис. 15. Схема гибридной солнечной комбинированной МГТУ ПЦ+ТКУ+Р с ОЦР с регенерацией: обозначения — те же, что на рис. 1, 4, 7, 8

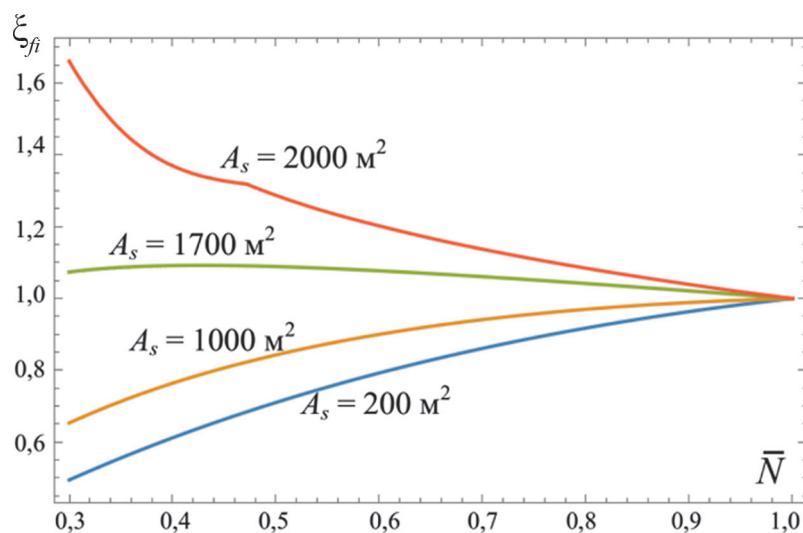


Рис. 16. Зависимость относительного коэффициента использования топлива когенерационной гибридной солнечной МГТУ ПЦ от нагрузки при различных площадях ФСК для июня (09.00)

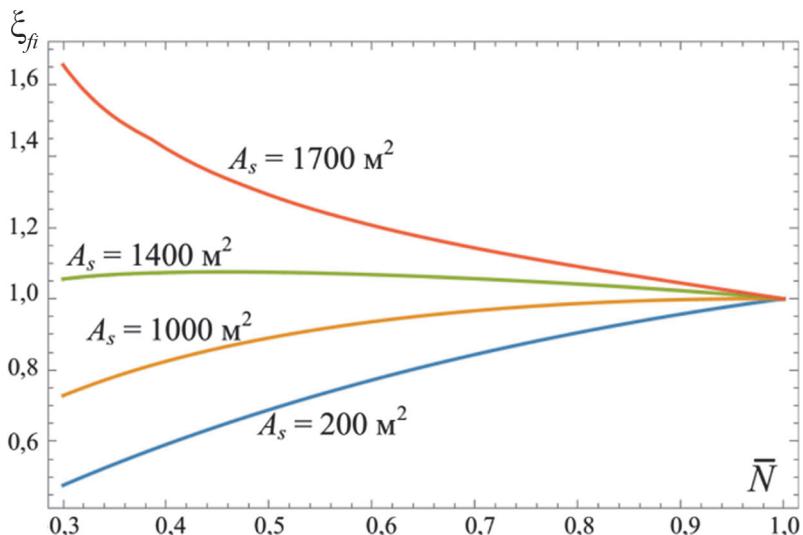


Рис. 17. Зависимость относительного коэффициента использования топлива когенерационной гибридной солнечной МГТУ ПЦ+Р от нагрузки при различных площадях ФСК для июня (09.00)

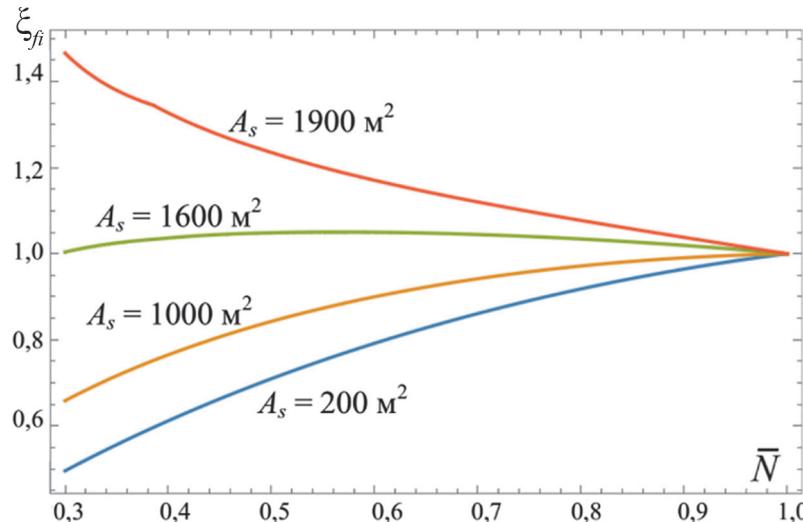


Рис. 18. Зависимость относительного коэффициента использования топлива когенерационной гибридной солнечной МГТУ ПЦ+ТКУ от нагрузки при различных площадях ФСК для июня (09.00)

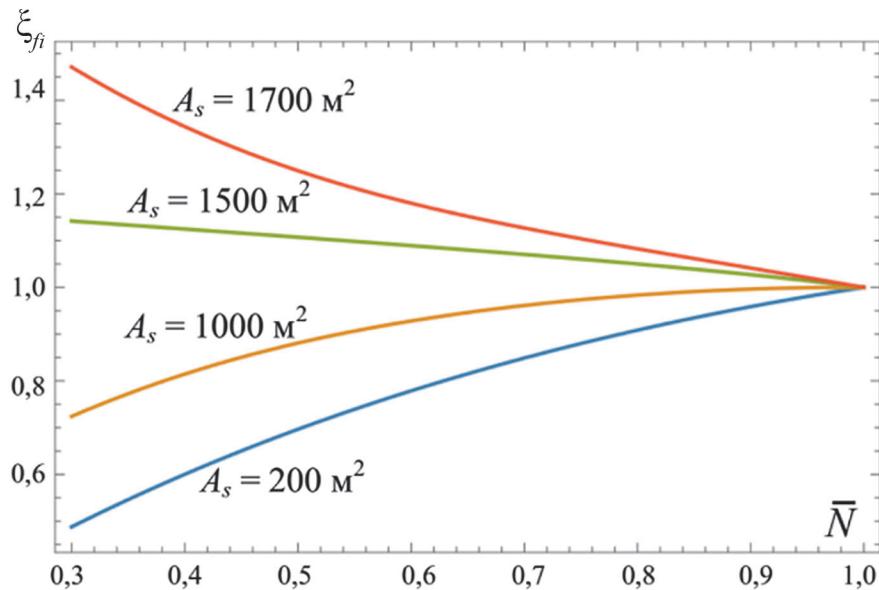


Рис. 19. Зависимость относительного коэффициента использования топлива когенерационной гибридной солнечной МГТУ ПЦ+ТКУ+Р от нагрузки при различных площадях ФСК для июня (09.00)

ных солнечных МГТУ на долевых нагрузках превышает аналогичную для номинального режима во всем диапазоне нагружения. Чем более эффективна гибридная энергетическая установка на номинальном режиме, тем меньше пороговое значение площади апертуры ФСК. Естественно, что для гибридных солнечных комбинированных МГТУ пороговые значения будут меньше, а эффективность гибридных солнечных МГТУ на долевых нагрузках будет зависеть и от рода рабочего тела установки ОЦР (рис. 20 — 23).

Данные рис. 20 — 23 демонстрируют, что относительный коэффициент использования топлива гибридных солнечных комбинированных МГТУ больше зависит от схемы МГТД и установки ОЦР, чем от рода рабочего тела ОЦР. Использование регенеративных схем установок ОЦР является предпочтительным, если это возможно. Наименьшими пороговыми значениями площади апертуры ФСК обладают МГТУ с регенерацией теплоты, как МГТД, так и ОЦР.

Поскольку при работе на генераторном режиме расход рабочего тела через установку на долевых нагрузках возрастает со снижением нагрузки, то гидравлическое сопротивление растет. Для гибридных солнечных комбинированных МГТУ на базе циклов с регенерацией коэффициенты восстановления давления понижаются при уменьшении нагрузки (рис. 24, 25), особенно для базовой установки, изображенной на рис. 6.

Таким образом, пороговые значения площади апертуры ФСК для гибридной солнечной комбинированной

МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р больше аналогичной на базе ПЦ+Р, хотя эффективность базовой МГТУ ПЦ+ТКУ+Р выше базовой ПЦ+Р.

### Заключение

Установлено, что в солнечное время при определенных площадях апертуры ФСК относительный коэффициент использования топлива гибридных солнечных комбинированных МГТУ не зависит от нагрузки независимо от схемы базовой конфигурации МГТД. При превышении этого порогового значения топливная экономичность данных МГТУ только возрастает.

Показано, что относительный коэффициент использования топлива на частичных нагрузках гибридных солнечных комбинированных МГТУ больше зависит от схемы базового МГТД и установки ОЦР, чем от рода рабочего тела ОЦР.

Определено, что использование регенеративных схем установок ОЦР в составе гибридных солнечных комбинированных МГТУ снижает пороговое значение площади апертуры ФСК.

Окончательный вывод о целесообразности выбора той или иной схемы МГТД, установки ОЦР и площади апертуры ФСК для гибридных солнечных комбинированных МГТУ возможен только после технико-экономического анализа всей совокупности режимов нагрузки энергетической установки и потребления локального объекта.

### References

- Дологонян А.В., Матвеенко В.Т., Стаценко И.Н. Термодинамические характеристики сложных циклов микрогоазотурбинных двигателей с интегрированным фокусирующим солнечным коллектором // Известия РАН. Серия «Энергетика». 2021. № 2. С. 128—150.

- Dologlonyan A.V., Matveenko V.T., Statsenko I.N. Termodinamicheskie Kharakteristiki Slozhnykh Tsiklov Mikrogazoturbinnnykh Dvigateley s Integrirovannym Fokusiruyushchim Solnechnym Kollektorom. Izvestiya RAN. Seriya «Energetika». 2021;2:128—150. (in Russian).

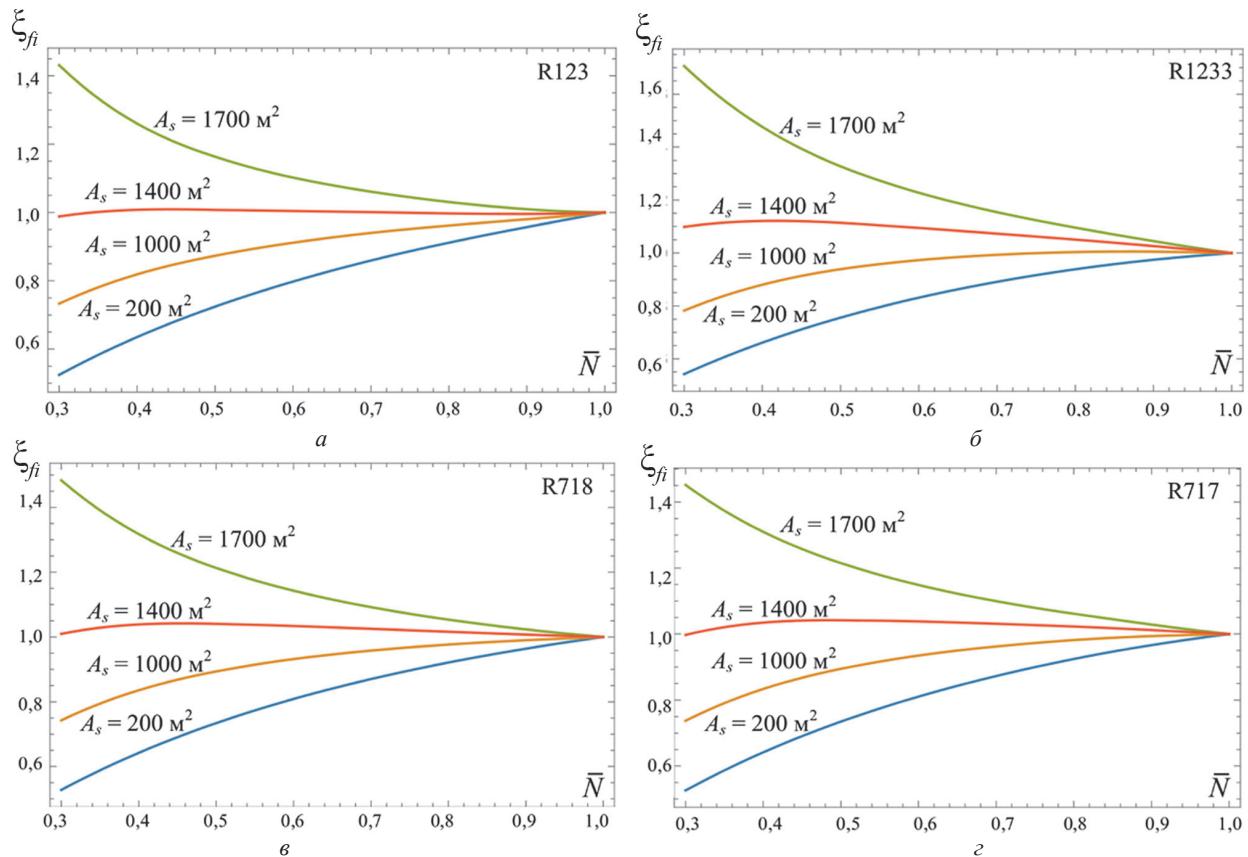


Рис. 20. Зависимость относительного коэффициента использования топлива когенерационной гибридной солнечной МГТУ ПЦ от нагрузки при различных площадях ФСК и рабочих телах установки ОЦР для июня (09.00):

*a* — R123; *δ* — R1233zd; *ε* — R718; *ζ* — R717

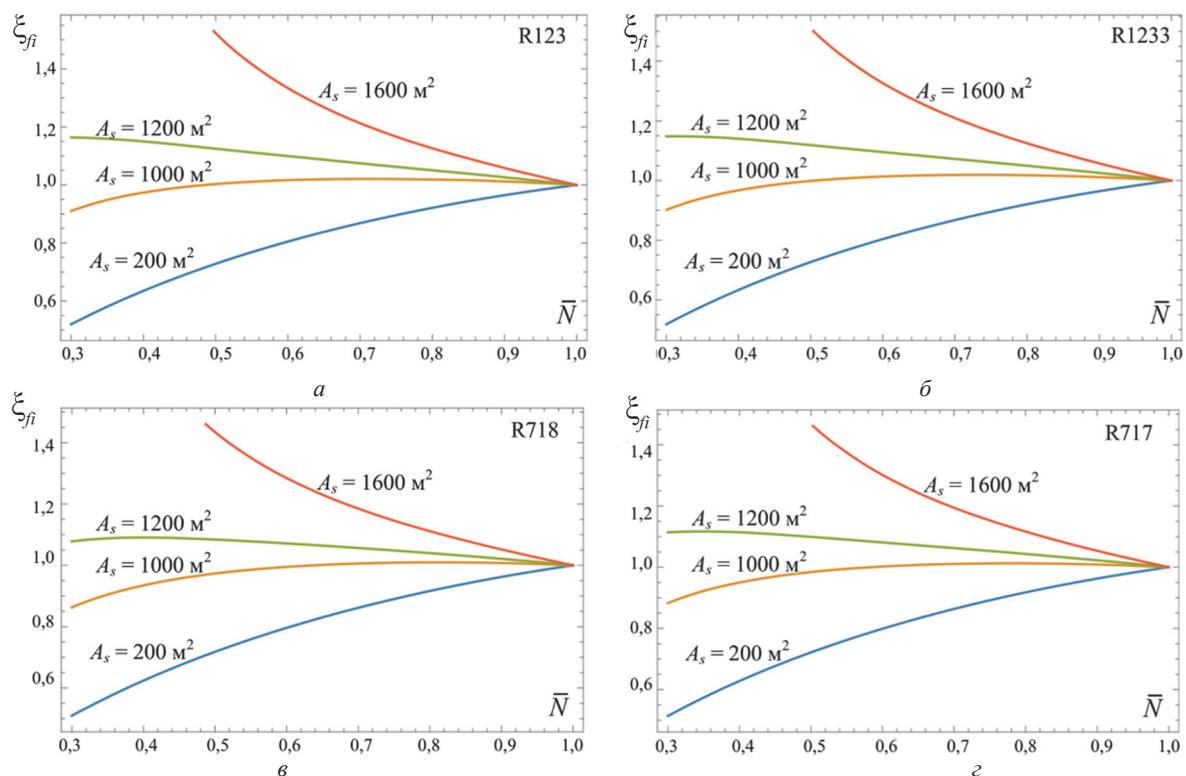


Рис. 21. Зависимость относительного коэффициента использования топлива когенерационной гибридной солнечной МГТУ ПЦ+Р от нагрузки при различных площадях ФСК и рабочих телах установки ОЦР для июня (09.00):

*a* — *ε* — те же, что на рис. 20

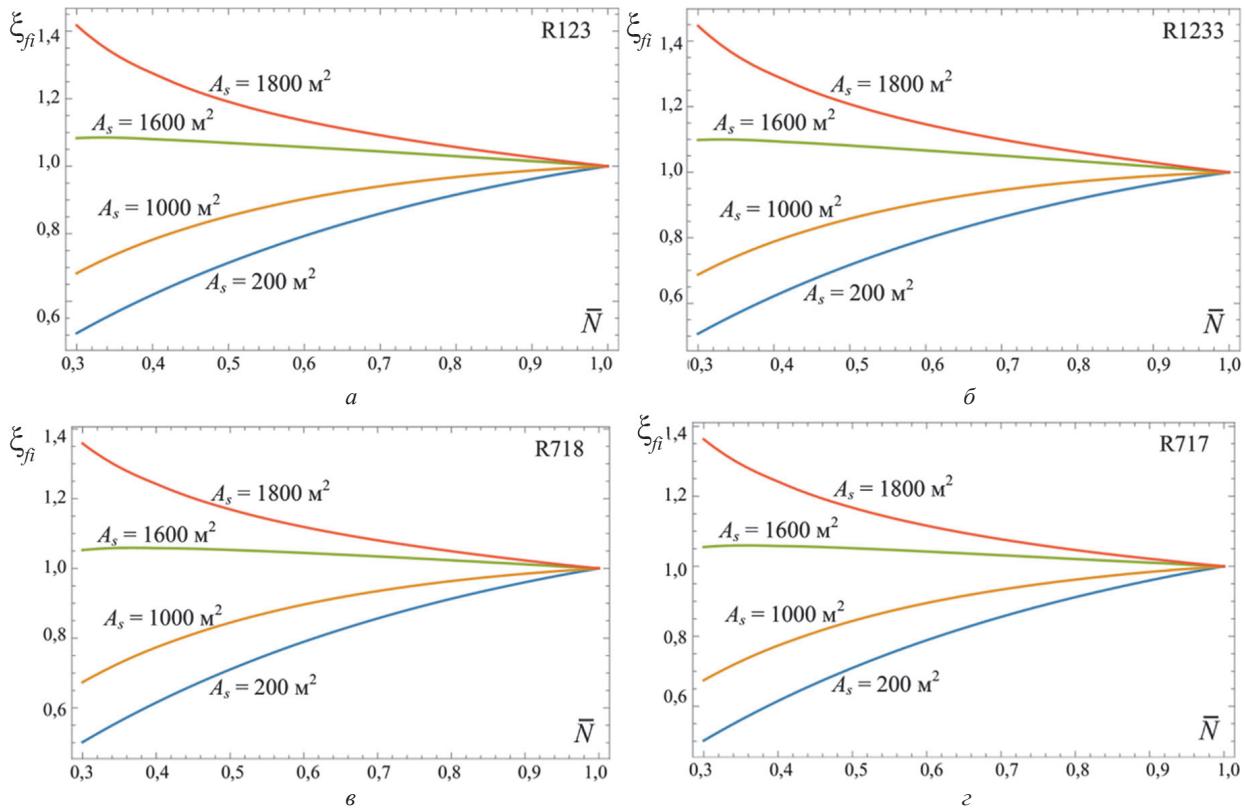


Рис. 22. Зависимость относительного коэффициента использования топлива когенерационной гибридной солнечной МГТУ ПЦ+ТКУ от нагрузки при различных площалях ФСК и рабочих тела установки ОЦР для июня (09.00):

*a* — *с* — те же, что на рис. 20

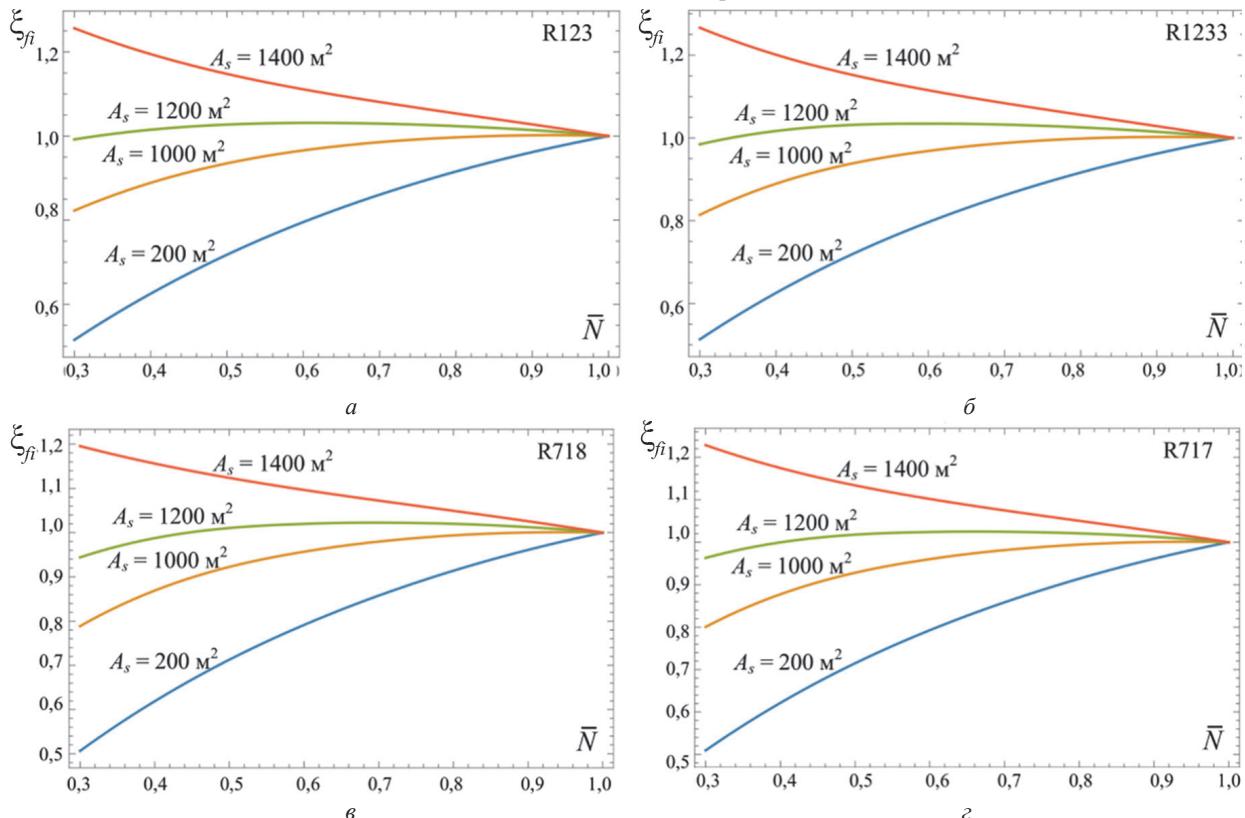


Рис. 23. Зависимость относительного коэффициента использования топлива когенерационной гибридной солнечной МГТУ ПЦ+ТКУ+Р от нагрузки при различных площалях ФСК и рабочих тела установки ОЦР для июня (09.00):

*a* — *с* — те же, что на рис. 20

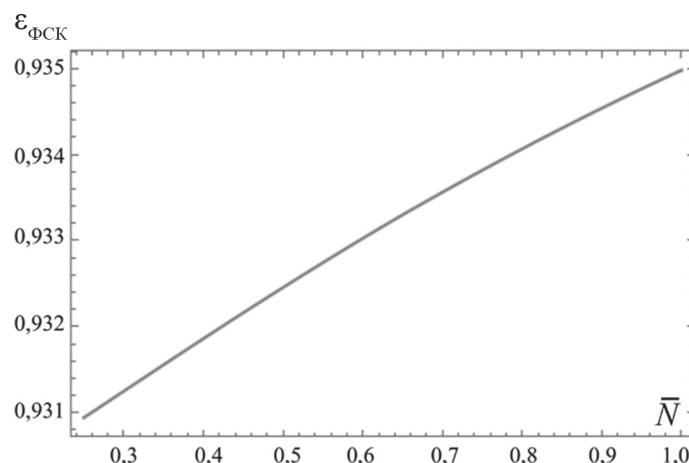


Рис. 24. Зависимость коэффициента восстановления давления ФСК площадью апертуры  $A_s = 3000 \text{ м}^2$  когенерационной гибридной солнечной комбинированной МГТУ ПЦ+Р от нагрузки для июля (12.00)

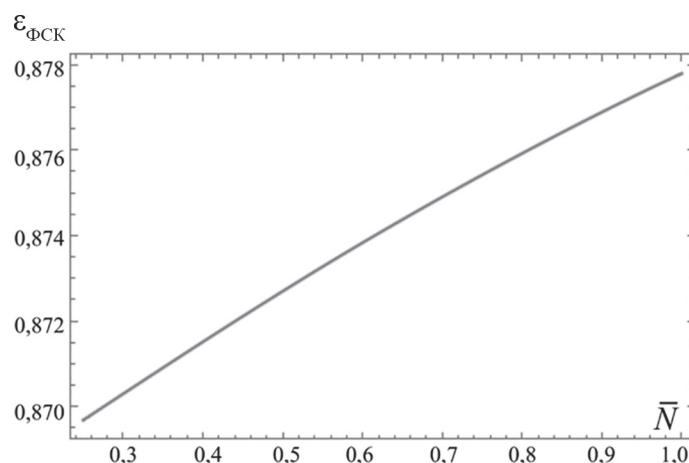


Рис. 25. Зависимость коэффициента восстановления давления ФСК площадью апертуры  $A_s = 3000 \text{ м}^2$  когенерационной гибридной солнечной комбинированной МГТУ ПЦ+ТКУ+Р от нагрузки для июля (12.00)

2. Дологонян А.В., Стребков Д.С., Матвеенко В.Т., Стаценко И.Н. Термодинамические характеристики гибридных солнечных микрогазотурбинных установок в условиях тропического климата // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2021. Т. 68. № 2(43). С. 20—35.

3. Матвеенко В.Т. Глубокая утилизация теплоты в газотурбинных двигателях с турбиной перерасширения // Промышленная теплотехника. 1997. Т. 19. № 4—5. С. 81—85.

4. Diener OF, Van der Spuy S.J., Von Backström T.W., Hildebrandt T. Multi-disciplinary Optimization of a Mixed-flow Compressor Impeller // Proc. ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Techn. Conf. and Exposition. 2016. P. 57008.

5. Qing-Hua Deng, Shuai Shao, Lei Fu, Hai-Feng Luan. An Integrated Design and Optimization Approach for Radial Inflow Turbines — Part I: Automated Preliminary Design // Appl. Sci. 2018. V. 8(11). P. 2038.

6. Vick M. e. a. A Simple Recuperated Ceramic Microturbine: Design Concept, Cycle Analysis, and Recu-

2. Dologlonyan A.V., Strebkov D.S., Matveenko V.T., Statsenko I.N. Termodinamicheskie Kharakteristiki Gibridnykh Solnechnykh Mikrogazoturbinnikh Ustanovok v Usloviyakh Tropicheskogo Klimata. Elektrotehnologii i Elektrooborudovanie v APK. 2021;68;2(43):20—35. (in Russian).

3. Matveenko V.T. Glubokaya Utilizatsiya Teploty v Gazoturbinnikh Dvigatelyakh s Turbinoy Perershireniya. Promyshlennaya Teplotekhnika. 1997;19;4—5: 81—85. (in Russian).

4. Diener OF, Van der Spuy S.J., Von Backström T.W., Hildebrandt T. Multi-disciplinary Optimization of a Mixed-flow Compressor Impeller. Proc. ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Techn. Conf. and Exposition. 2016:57008.

5. Qing-Hua Deng, Shuai Shao, Lei Fu, Hai-Feng Luan. An Integrated Design and Optimization Approach for Radial Inflow Turbines—Part I: Automated Preliminary Design. Appl. Sci. 2018;8(11):2038.

6. Vick M. e. a. A Simple Recuperated Ceramic Microturbine: Design Concept, Cycle Analysis, and Recu-

operator Component Prototype Tests // Proc. ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Techn. Conf. and Exposition. 2016. P. 57780.

7. **Арбеков А.Н. и др.** Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок. М. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017.

8. **Дологонян А.В., Матвеенко В.Т., Очеретянnyй В.А.** Оптимизация степени регенерации для циклов газотурбинных установок с кожухотрубными регенераторами // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2021. № 4(348). С. 19—27.

9. **Matviienko V., Ocheretianiy V.** Variable Regimes Operation of Cogenerative Gas Turbine Engines with Overexpansion Turbine // Proc. ASME Turbo Expo 2010: Power of Land, Sea and Air Conf. Glasgow, 2010.

10. **Переходные процессы в газотурбинных установках** / под ред. И.В. Котляра. Л.: Машиностроение, 1973.

11. **Котляр И.В.** Частичные и переходные режимы работы судовых газотурбинных установок. Л.: Судостроение, 1966.

12. **Матвеенко В.Т., Дологонян А.В., Очеретянnyй В.А.** Управление характеристиками замкнутых газотурбинных установок пропульсивных комплексов подводных судов // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 4—1(54). Т. 1. С. 66—70.

13. **Dudley V.E. e. a.** Test results: SEGS LS-2 Solar Collector. USA, 1994.

14. **Forristall R.** Heat Transfer Analysis and Modeling of a Parabolic Trough Solar Receiver Implemented in Engineering Equation Solver. USA, 2003.

15. **Справочник по климату СССР** / под ред. Е.И. Ильиных. Л.: Гидрометеоиздат, 1966.

16. **Даффи Дж.А., Бекман У.А.** Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. М.: Мир, 1977.

operator Component Prototype Tests. Proc. ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Techn. Conf. and Exposition. 2016:57780.

7. **Arbekov A.N. i dr.** Teoriya i Proektirovaniye Gazoturbinnikh i Kombinirovannykh Ustanovok. M. Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2017. (in Russian).

8. **Dologlonyan A.V., Matveenko V.T., Ocheretyanny V.A.** Optimizatsiya Stepeni Regeneratsii Dlya Tsiklov Gazoturbinnikh Ustanovok s Kozhukhotrubnymi Regeneratorami. Fundamental'nye i Prikladnye Problemy Tekhniki i Tekhnologii. 2021;4(348):19—27. (in Russian).

9. **Matviienko V., Ocheretianiy V.** Variable Regimes Operation of Cogenerative Gas Turbine Engines with Overexpansion Turbine. Proc. ASME Turbo Expo 2010: Power of Land, Sea and Air Conf. Glasgow, 2010.

10. **Perekhodnye Protsessy v Gazoturbinnikh Ustanovakh**. Pod Red. I.V. Kotlyara. L.: Mashinostroenie, 1973. (in Russian).

11. **Kotlyar I.V.** Chastichnye i Perekhodnye Rezhimy Raboty Sudovykh Gazoturbinnikh Ustanovok. L.: Sudostroenie, 1966. (in Russian).

12. **Matveenko V.T., Dologlonyan A.V., Ocheretyanny V.A.** Upravlenie Kharakteristikami Zamknutnykh Gazoturbinnikh Ustanovok Propul'sivnykh Kompleksov Podvodnykh Sudov. Morskie Intellektual'nye Tekhnologii. 2021;4—1(54);1:66—70. (in Russian).

13. **Dudley V.E. e. a.** Test results: SEGS LS-2 Solar Collector. USA, 1994.

14. **Forristall R.** Heat Transfer Analysis and Modeling of a Parabolic Trough Solar Receiver Implemented in Engineering Equation Solver. USA, 2003.

15. **Spravochnik po Klimatu SSSR.** Pod Red. E.I. Il'inykh. L.: Gidrometeoizdat, 1966. (in Russian).

16. **Daffi Dzh.A., Bekman U.A.** Teplovye Protsessy s Ispol'zovaniem Solnechnoy Energii. M.: Mir, 1977. (in Russian).

### Сведения об авторах:

**Дологонян Андрей Вартазарович** — кандидат технических наук, заведующий лабораторией Института природно-технических систем Российской академии наук, Севастополь, e-mail: dologlonyan@mail.ru

**Матвеенко Валерий Тимофеевич** — доктор технических наук, главный научный сотрудник Института природно-технических систем Российской академии наук, Севастополь, e-mail: mvt3900@mail.ru

**Клименко Александр Георгиевич** — ведущий инженер Института природно-технических систем Российской академии наук, Севастополь, e-mail: kag195877@gmail.com

### Information about authors:

**Dologlonyan Andrey V.** — Ph.D. (Techn.), Head of the Laboratory, Institute of Natural and Technical Systems of the Russian Academy of Sciences, Sevastopol, e-mail: dologlonyan@mail.ru

**Matveenko Valeriy T.** — Dr.Sci. (Techn.), Chief Scientific Officer, Institute of Natural and Technical Systems of the Russian Academy of Sciences, Sevastopol, e-mail: mvt3900@mail.ru

**Klimenko Aleksandr G.** — Leading Engineer, Institute of Natural and Technical Systems of the Russian Academy of Sciences, Sevastopol, e-mail: kag195877@gmail.com

**Работа выполнена** по госбюджетной теме ИПТС «Создание научных основ разработки гибких мультигенерационных установок с использованием возобновляемых источников энергии и местных ресурсов холода в условиях климатических изменений» (госрегистрация № 121122300068-6).

**The work is executed** on the State Budget Topic of the IPTS «Creation of Scientific Foundations for the Development of Flexible Multigenerational Installations Using Renewable Energy Sources and Local Cold Resources in Conditions of Climate Change» (State Registration No. 121122300068-6).

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 24.11.2022

**The article received to the editor:** 24.11.2022

**Статья принята к публикации:** 06.06.2023

**The article has been accepted for publication:** 06.06.2023