

Методика поверочных расчетов параметров замкнутых газотурбинных установок космического назначения

© А.В. Каревский, С.Ю. Штонда

АО ГНЦ «Центр Келдыша», Москва, 125438, Россия

Рассмотрена методика поверочных расчетов параметров замкнутых газотурбинных установок космического назначения на различных режимах работы и при изменении внешних условий. В основе методики лежит алгоритм нахождения условий совместной работы турбины и компрессора в замкнутом контуре газотурбинного преобразования энергии, с последующим уточнением температуры рабочего тела на входе в компрессор. Нахождение общей рабочей точки турбины и компрессора осуществляется с использованием их универсальных расходно-напорных характеристик, полученных экспериментальным путем или рассчитанных с использованием методов подобия лопаточных машин. Для уточнения температуры рабочего тела перед компрессором дополнительно рассматриваются условия обеспечения баланса между тепловой мощностью, отводимой в контур холодильника-излучателя, и тепловой мощностью, сбрасываемой холодильником-излучателем в окружающее пространство. Дано краткое описание разработанной программы для ЭВМ, в которой реализована рассматриваемая методика. Приведены результаты тестовых расчетов.

Ключевые слова: замкнутая газотурбинная установка, методика расчета, цикл Брайтона, холодильник-излучатель

Введение. Системы преобразования энергии (СПЭ) на основе замкнутых газотурбинных установок (ЗГТУ), работающих по циклу Брайтона с регенерацией тепла, рассматриваются в нашей стране и за рубежом для применения в составе перспективных космических энергетических и энергодвигательных установок большой мощности (сотни киловатт — мегаватты), в том числе использующих для своей работы ядерные источники энергии [1–5]. Схема СПЭ на основе ЗГТУ с источником тепловой энергии в виде ядерного реактора приведена на рис. 1; на рис. 2 в координатах энтальпия H — энтропия S изображен термодинамический цикл работы ЗГТУ.

Преобразование тепловой энергии нагретого в реакторе рабочего тела (как правило, инертного газа или смеси инертных газов) в электрическую энергию осуществляется турбокомпрессор-генератором (ТКГ), конструктивно объединяющим в единую сборочную единицу турбину, компрессор и электрический генератор. Теплообменник-рекуператор (ТР) обеспечивает повышение КПД преобразования энергии в цикле ЗГТУ рекуперацией теплоты посредством теплопередачи между рабочим телом, поступающим в «горячий» тракт ТР с выхода турбины и направляемым далее на вход в теплообменник-холодильник (ТХ), и рабочим телом, поступающим в «холодный»

тракт ТР с выхода компрессора и направляемым далее на вход реактора. Отвод теплоты, не использованной в цикле преобразования энергии, осуществляется в трактах ТХ посредством теплопередачи от рабочего тела, поступающего с выхода «горячего» тракта ТР и направляемого далее с минимальной температурой цикла на вход в компрессор, к жидкостному теплоносителю контура холодильника-излучателя (ХИ). Теплота, воспринятая жидкостным теплоносителем в ТХ, далее сбрасывается излучением с поверхности ХИ в окружающее пространство.

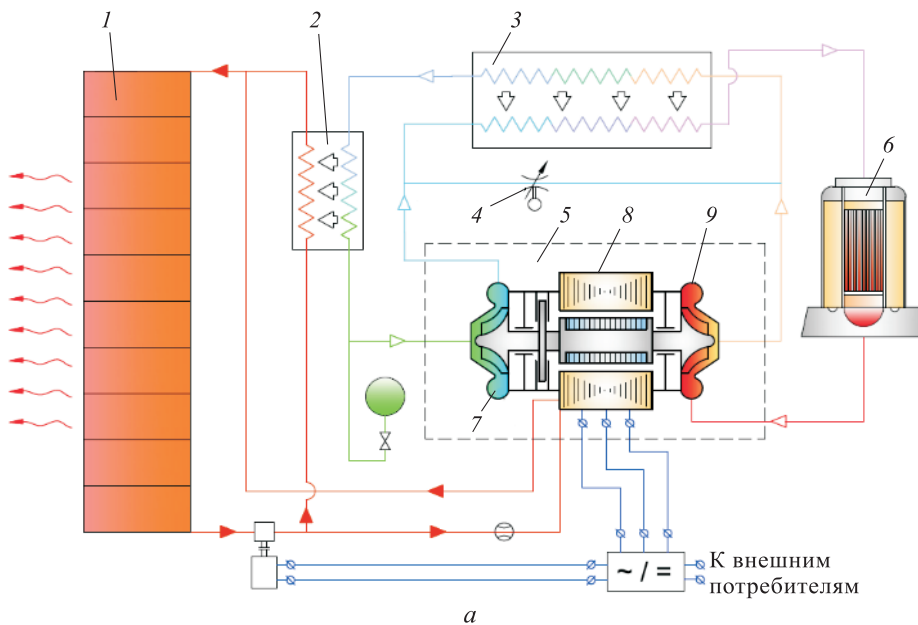


Рис. 1. Схема системы преобразования энергии на основе ЗГТУ:

1 — холодильник-излучатель; 2 — теплообменник-холодильник; 3 — теплообменник-рекуператор; 4 — регулируемый дроссель; 5 — турбокомпрессор-генератор; 6 — реактор; 7 — компрессор; 8 — генератор; 9 — турбина

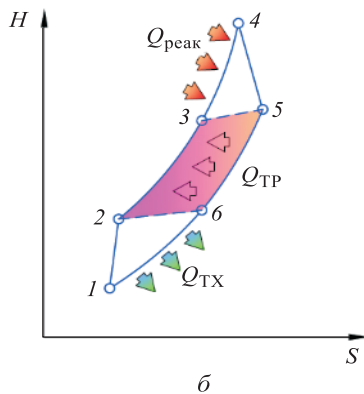


Рис. 2. Термодинамический цикл работы ЗГТУ:

1-2 — сжатие в компрессоре; 2-3 — подогрев в теплообменнике-рекуператоре $Q_{ТР}$; 3-4 — подвод теплоты в реакторе $Q_{реак}$; 4-5 — расширение на турбине; 5-6 — охлаждение в рекуператоре; 6-1 — отвод теплоты в теплообменнике-холодильнике $Q_{ТХ}$

Избыточная механическая мощность на валу ТКГ (разность между мощностью, вырабатываемой турбиной, и мощностью, потребляемой компрессором) преобразуется генератором переменного тока в электричество. Электрическая энергия, вырабатываемая электрогенератором, затем трансформируется в необходимые номиналы токов и напряжений и распределяется по потребителям.

Постановка задачи. Проектирование СПЭ на основе ЗГТУ осуществляется, как правило, для набора параметров, соответствующих какому-то одному режиму работы, принимаемому за номинальный. В то же время в процессе эксплуатации ЗГТУ работает на различных эксплуатационных режимах (форсированном, промежуточных, дежурном и пр.), на которых величина вырабатываемой электрической мощности существенно отличается от мощности номинального режима. Для выполнения поверочных расчетов, в результате которых для известных проектных параметров агрегатов ЗГТУ и заданных условий работы определяются параметры рабочего тела (температура, давление, расход) в характерных точках контура, мощности агрегатов и выходная электрическая мощность ЗГТУ на различных эксплуатационных режимах работы, предлагается методика, основанная на алгоритме нахождения условий совместной работы турбины и компрессора в составе замкнутого контура преобразования энергии.

Алгоритм поверочного расчета контура ЗГТУ. Рассмотрим алгоритм поверочного расчета контура ЗГТУ в предположении, что температуры рабочего тела на входе в турбину и компрессор известны. В основе такого расчета лежит алгоритм нахождения общей рабочей точки турбины и компрессора при их работе в замкнутом контуре и определения параметров агрегатов ЗГТУ в этой точке. В рабочей точке при заданных параметрах рабочего тела на входе в компрессор и турбину и при заданной частоте вращения вала ТКГ должны удовлетворяться следующие условия:

$$\pi_T^* = \sigma_\Sigma \pi_K^* \quad (1)$$

$$\dot{m}_T = \dot{m}_K (1 - \bar{g}_K), \quad (2)$$

где $\pi_T^* = \frac{p_4^*}{p_5^*}$ и $\pi_K^* = \frac{p_2^*}{p_1^*}$ — относительные перепады давлений рабочего

тела на компрессоре и на турбине соответственно (здесь и далее верхний индекс «*» относится к параметрам торможения, а нижние цифровые индексы для температур T и давлений p рабочего тела соответствуют нумерации характерных точек цикла ЗГТУ на рис. 2);

$\sigma_\Sigma = \Pi \sigma_i = \Pi \left(1 - \frac{\Delta p_i^*}{p_{\text{вх}i}^*} \right)$ — суммарный коэффициент сохранения

полного давления в контуре (здесь $p_{вх_i}^*$ и Δp_i^* — входное давление и потери давления рабочего тела на i -м участке контура).

Участками контура, в которых происходят потери давления, являются «горячий» и «холодный» тракты теплообменника-рекуператора, газовый тракт теплообменника-холодильника, тракты реактора, а также трубопроводы, объединяющие проточные тракты агрегатов в замкнутый контур; \dot{m}_T и \dot{m}_K — массовые расходы рабочего тела через турбину и через компрессор соответственно; $\bar{g}_K = 1 - \frac{\dot{m}_T}{\dot{m}_K}$ — параметр, учитывающий разность расходов рабочего тела через компрессор и турбину.

Для изображенной на рис. 1 схемы ЗГТУ эта разность расходов может быть обусловлена, например, перепуском рабочего тела после компрессора по байпасной магистрали на выход из турбины для обеспечения регулирования в определенных пределах вырабатываемой электрической мощности. В этом случае для участков замкнутого контура, расположенных между выходом из компрессора и выходом из турбины («холодный» тракт ТР, реактор, проточная часть турбины, соответствующие трубопроводы), расход рабочего тела будет равен расходу через турбину, а для остальных участков («горячий» тракт ТР, ТХ, проточная часть компрессора, соответствующие трубопроводы) — расходу через компрессор.

Основой для поиска общей рабочей точки турбины и компрессора являются полученные экспериментальным путем или рассчитанные с использованием методов подобия лопаточных машин [6, 7]:

универсальные напорные характеристики компрессора

$$\bar{H}_K = f_{H_K}(\bar{Q}_K; \bar{n}_K); \quad (3)$$

универсальные расходные характеристики турбины

$$\bar{m}_T = f_{m_T}(\pi_T^*; \bar{n}_T). \quad (4)$$

Для нахождения мощностей компрессора и турбины в общей рабочей точке характеристики (3) и (4) дополняются характеристиками экономичности компрессора

$$\eta_K = f_{\eta_K}(\bar{Q}_K; \bar{n}_K) \quad (5)$$

и турбины

$$\eta_T = f_{\eta_T}(\pi_T^*; \bar{n}_T). \quad (6)$$

В формулах (3)–(6): $\bar{n}_k = \frac{n}{\sqrt{T_1^*}}$ и $\bar{n}_T = \frac{n}{\sqrt{T_4^*}}$ — приведенные частоты вращения рабочих колес компрессора и турбины соответственно (n — частота вращения ротора ТКГ); $\bar{H}_k = \frac{H_k}{n^2}$ — приведенный напор компрессора ($H_k = \frac{k}{k-1} RT_1^* \left(\pi_k^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)$ — адиабатный напор компрессора, k и R — показатель адиабаты и газовая постоянная рабочего тела соответственно); $\bar{Q}_k = \frac{\dot{Q}_k}{n}$ — приведенный объемный расход рабочего тела через компрессор ($\dot{Q}_k = \frac{\dot{m}_k RT_1^*}{p_1^*}$ — объемный расход рабочего тела на входе в компрессор); $\bar{m}_T = \frac{\dot{m}_T \sqrt{T_4^*}}{p_4^*}$ — приведенный массовый расход рабочего тела через турбину; η_k и η_T — КПД компрессора и турбины соответственно.

Для нахождения общей рабочей точки турбины и компрессора должны быть известны или заданы следующие данные: вид функций (3)–(6), описывающих универсальные характеристики компрессора и турбины; частота вращения n вала ТКГ; температура T_1^* и давление p_1^* рабочего тела на входе в компрессор; температура T_4^* рабочего тела на входе в турбину; коэффициент сохранения полного давления контура σ_Σ ; параметр \bar{g}_k ; теплофизические свойства рабочего тела.

Нахождение совместной рабочей точки компрессора и турбины представляет собой процедуру перестроения напорной характеристики компрессора (3) и расходной характеристики турбины (4) в координаты перепад давлений на компрессоре π_k — расход через компрессор \dot{m}_k и определение точки пересечения этих характеристик (рис. 3). Алгоритм этой процедуры иллюстрируется блок-схемой на рис. 4. Данный алгоритм представляет собой многоитерационный процесс, в ходе которого рассчитываются и сравниваются два значения массового расхода рабочего тела через компрессор: расхода \dot{m}_k , определяемого по напорным характеристикам компрессора (3), и расхода \dot{m}'_k , вычисленного по формуле (2) для значения, рассчитанного по расходным характеристикам (4) расхода через турбину \dot{m}_T .

В ходе итераций корректируется значение приведенного объемного расхода \bar{Q}_k до тех пор, пока значения расходов \dot{m}_k и \dot{m}'_k не будут различаться не более чем на заданную малую величину ε_m .

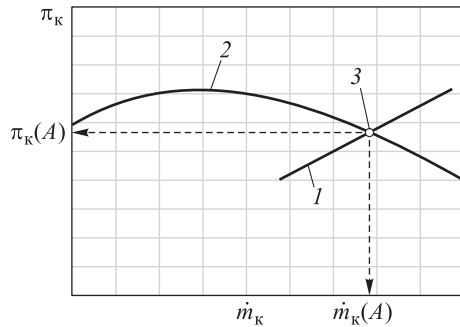


Рис. 3. Поиск общей рабочей точки компрессора и турбины:

1 — перестроенная расходная характеристика турбины; 2 — напорная характеристика компрессора; 3 — рабочая точка А

После нахождения общей рабочей точки и определения параметров рабочего тела на выходе из компрессора и турбины выполняются поверочные расчеты агрегатов ЗГТУ (рис. 5): теплообменника-рекуператора и теплообменника-холодильника [8, 9], ядерного реактора, а также трубопроводов, объединяющих проточные тракты агрегатов в замкнутый контур.

В результате этих расчетов определяются неизвестные температуры и давления на входе и выходе агрегатов ЗГТУ, а также потери давления рабочего тела и соответствующие этим потерям значения коэффициентов сохранения полного давления в проточных трактах агрегатов ЗГТУ.

Если полученное в результате поверочных расчетов агрегатов ЗГТУ значение коэффициента сохранения полного давления в контуре σ'_Σ отличается от принятого ранее значения σ_Σ более чем на заданную малую величину ε_Σ , то повторяется описанная выше процедура поиска совместной рабочей точки турбины и компрессора. Затем окончательно вычисляются:

мощность, потребляемая компрессором,

$$N_k = C_p \dot{m}_k (T_2^* - T_1^*) = C_p \dot{m}_k T_1^* \left(\pi_k^{*\frac{k-1}{k}} - 1 \right) / \eta_k, \quad (7)$$

где C_p — удельная теплоемкость рабочего тела контура ЗГТУ;

мощность, вырабатываемая турбиной,

$$N_T = C_p \dot{m}_T (T_4^* - T_5^*) = C_p \dot{m}_k (1 - \bar{g}_k) T_4^* \left[1 - \left(\frac{1}{\pi_k^* \sigma_\Sigma} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \eta_T; \quad (8)$$

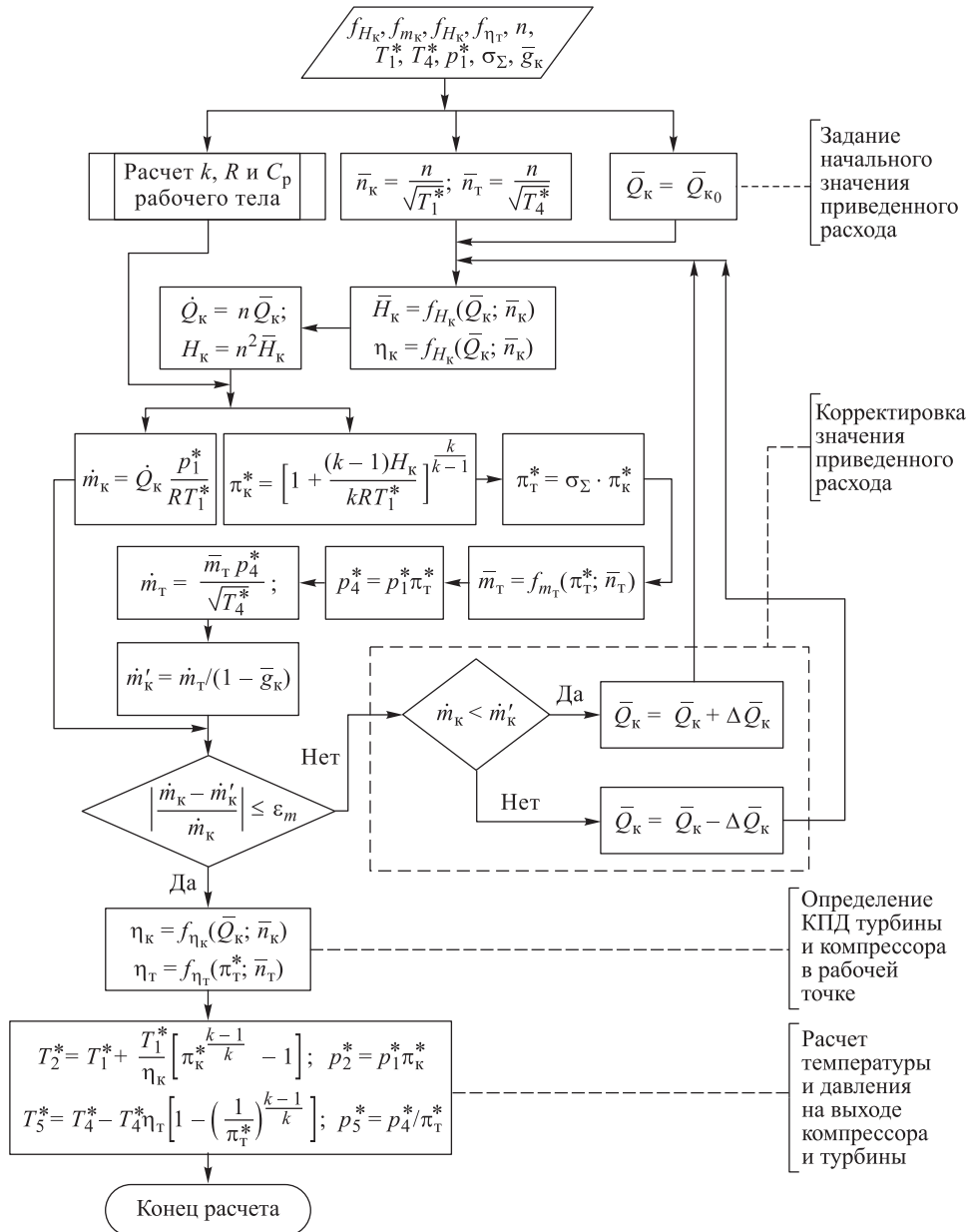


Рис. 4. Блок-схема алгоритма поиска общей рабочей точки компрессора и турбины

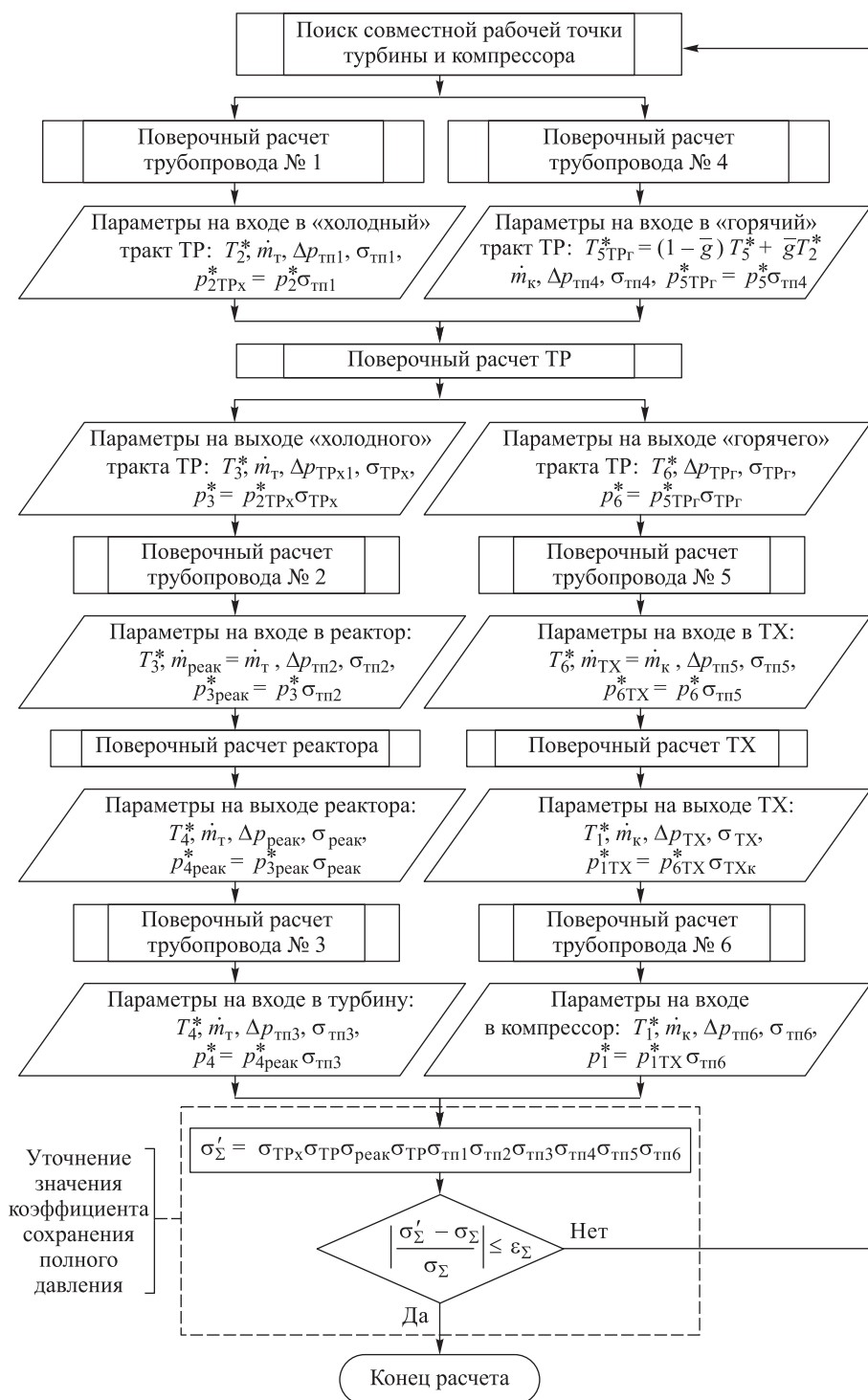


Рис. 5. Блок-схема проведения поверочных расчетов агрегатов ЗГТУ

выходная электрическая мощность ЗГТУ

$$N_{эл} = (N_T - N_K) \eta_{эГ}, \quad (9)$$

где $\eta_{эГ}$ — КПД электрического генератора ТКГ;

тепловая мощность теплообменника-рекуператора

$$N_{ТР} = C_P \dot{m}_T (T_5^* - T_6^*);$$

тепловая мощность теплообменника-холодильника

$$N_{ТХ} = \dot{m}_K C_P (T_6^* - T_1^*);$$

тепловая мощность реактора

$$N_{реак} = \dot{m}_T C_P (T_4^* - T_3^*).$$

Алгоритм совместного поверочного расчета ЗГТУ и контура холодильника-излучателя. В рассмотренном выше алгоритме поверочного расчета контура ЗГТУ считается, что температура рабочего тела перед компрессором T_1^* известна. Однако если рассматривать холодильник-излучатель как нерегулируемый сток теплоты с постоянной площадью излучения и с постоянным расходом теплоносителя по его контуру, то изменение внешних условий его работы (например, падающего теплового потока от Солнца) или массового расхода рабочего тела по контуру ЗГТУ приведет к изменению сбрасываемой тепловой мощности и, соответственно, температуры перед компрессором T_1^* . В этом случае для нахождения T_1^* необходимо выполнить совместный поверочный расчет параметров контура ЗГТУ и контура холодильника-излучателя. Алгоритм такого расчета базируется на выполнении условий баланса между тепловой мощностью, отводимой от ЗГТУ в ТХ, и тепловой мощностью, сбрасываемой холодильником-излучателем в окружающее пространство (см. рис. 1):

$$\dot{m}_K C_P (T_6^* - T_1^*) = \dot{m}_{ТН} C_{PТН} (T_{ТХВЫХ} - T_{ТХВХ}); \quad (10)$$

$$\dot{m}_{ТН} C_{PТН} (T_{ТХВЫХ} - T_{ТХВХ}) = \dot{m}_{ТН} C_{PТН} (T_{ХИВЫХ} - T_{ХИВХ}) = N_{ХИ}, \quad (11)$$

где $C_{PТН}$ — удельная теплоемкость теплоносителя контура ХИ; $\dot{m}_{ТН}$ — массовый расход теплоносителя контура холодильника-излучателя, значение которого при проведении расчетов считается заданным; $T_{ТХВХ}$ и $T_{ТХВЫХ}$ — температуры теплоносителя контура холодильника-излучателя на входе в ТХ и на выходе из ТХ соответственно;

$T_{ХИ\text{вх}}$ и $T_{ХИ\text{вых}}$ — температуры теплоносителя контура на входе и на выходе холодильника-излучателя соответственно; $N_{ХИ}$ — тепловая мощность, сбрасываемая поверхностью холодильника-излучателя в окружающее пространство.

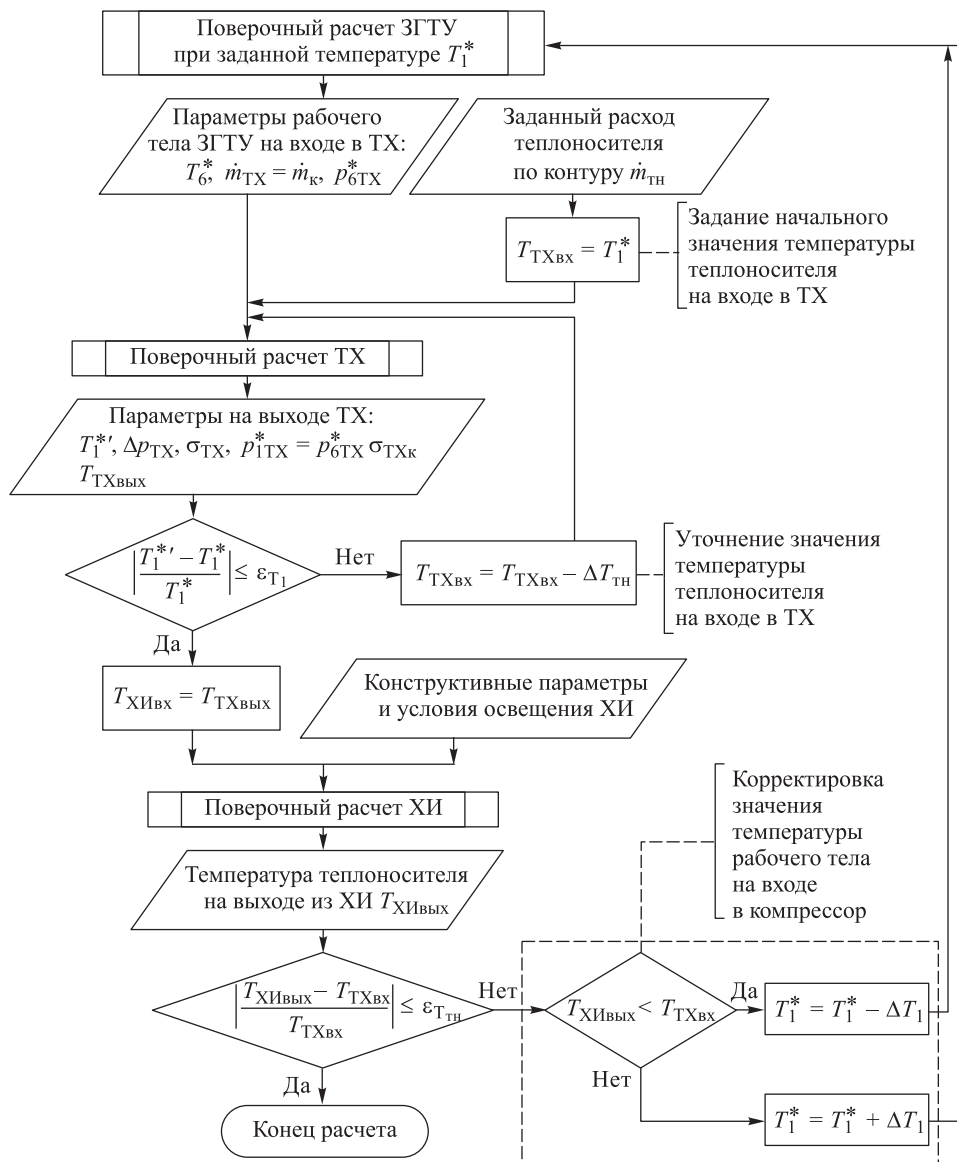


Рис. 6. Блок-схема алгоритма совместного поверочного расчета контура ЗГТУ и контура холодильника-излучателя (ХИ)

Для проточного панельного холодильника-излучателя мощность $N_{ХИ}$ в общем случае зависит [10] от конфигурации (плоский, цилиндрический, крестообразный и пр.), геометрических параметров

поверхности (площадь, ширина и толщина оребрения), свойств материала (коэффициент теплопроводности, степень черноты и коэффициент поглощения солнечного излучения), параметров проточного тракта (форма сечения, длина и количество каналов), падающего теплового потока, расхода и теплофизических свойств теплоносителя.

Алгоритм совместного поверочного расчета контура ЗГТУ и контура ХИ представляет собой многоитерационный процесс, включающий последовательные расчеты контура ЗГТУ, теплообменника-холодильника и холодильника-излучателя (рис. 6) с учетом условий обеспечения теплового баланса (10) и (11). В ходе итераций корректируется значение температуры рабочего тела на входе в компрессор T_1^* до тех пор, пока соответствующие ей температуры теплоносителя на выходе из холодильника-излучателя $T_{ХИ\text{ вых}}$ и на входе в теплообменник-холодильник $T_{ТХ\text{ вх}}$ будут различаться не более чем на заданную малую величину $\varepsilon_{Т\text{тн}}$.

Реализация методики и результаты тестовых расчетов. Рассмотренная выше методика поверочных расчетов замкнутых газотурбинных установок космического назначения реализована в разработанной в АО ГНЦ «Центр Келдыша» программе для ЭВМ «Программа поверочных расчетов энергоблока ядерной энергодвигательной установки» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015618315 от 05.08.2015). Код программы написан на языке программирования Visual Basic, среда разработки — Microsoft Visual Studio Professional 2013.

Интерфейс программы содержит несколько вкладок. Вид начальной вкладки, в которой вводятся общие данные для расчета, приведен на рис. 7. На остальных вкладках вводятся данные по конструктивным параметрам агрегатов ЗГТУ (ТКГ, теплообменным аппаратам, реактору, трубопроводам) и холодильника-излучателя, а также другие данные, необходимые для проведения поверочных расчетов.

Поверочные расчеты агрегатов ЗГТУ выполняются в отдельных программных модулях, вызов которых осуществляется из основной программы. При вызове этих модулей в качестве входных аргументов используются параметры, значения которых считываются с соответствующих вкладок основной программы, и параметры, определяемые в процессе расчета.

Расчеты теплофизических свойств газообразного рабочего тела ЗГТУ и теплоносителя контура холодильника-излучателя в зависимости от температуры и давления также организованы в отдельных программных модулях. Эти модули могут вызываться как в основной программе, так и в программных модулях расчета агрегатов ЗГТУ.

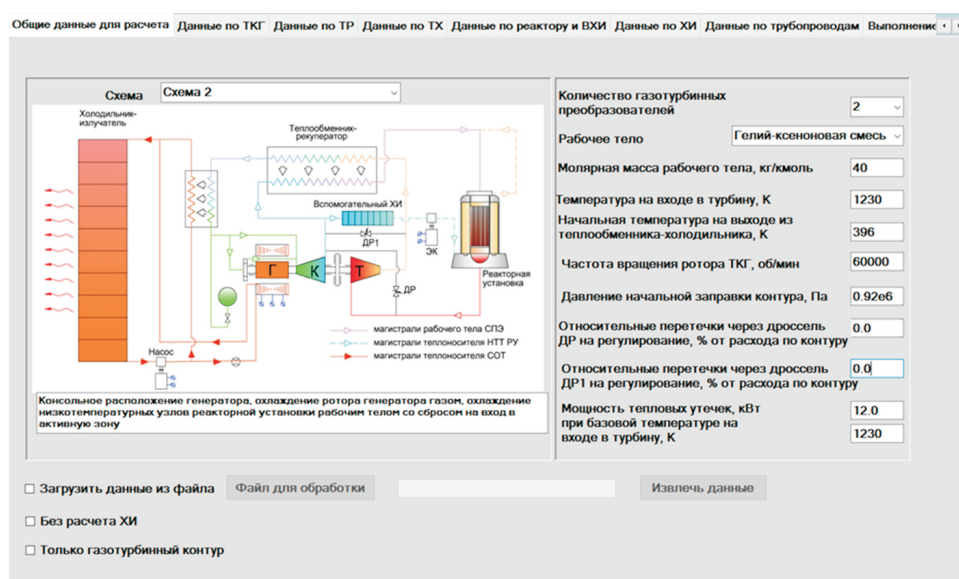


Рис. 7. Начальная вкладка программы для ввода общих данных для поверочного расчета ЗГТУ

В разработанной программе имеется дополнительная опция для расчетов параметров ЗГТУ при зафиксированной тепловой мощности реактора $N_{\text{реак}}^{\Phi}$. При задействовании данной опции фиксируется значение тепловой мощности реактора, полученное в ходе расчетов ЗГТУ при некоторых исходных значениях параметров, принимаемых за номинальные. Далее изменяются значения каких-либо параметров (например, частоты вращения вала ТКГ, количества рабочего тела в контуре ЗГТУ, внешнего теплового потока на поверхность холодильника-излучателя, расхода теплоносителя по контуру ХИ и пр.) и проводятся поверочные расчеты ЗГТУ для этих новых параметров с итерационным варьированием температуры рабочего тела на входе в турбину T_4^* . Итерации по температуре T_4^* выполняются до тех пор, пока рассчитанное значение тепловой мощности реактора $N_{\text{реак}}$ будет отличаться от значения $N_{\text{реак}}^{\Phi}$ не более чем на заданную малую величину.

Ниже приведены результаты тестовых расчетов ЗГТУ, полученных с использованием опции фиксации тепловой мощности реактора.

Влияние параметра \bar{g}_k , определяющего величину перепуска рабочего тела по байпасной магистрали через регулируемый дроссель (ДР), на выходную электрическую мощность ЗГТУ, а также на температуру рабочего тела перед компрессором и турбиной показано на рис. 8. Значения параметров приведены в безразмерном виде

$$\bar{\Pi} = \Pi/\Pi_H,$$

где Π_H — номинальное значение параметра, соответствующее $\bar{g}_k = 0$.

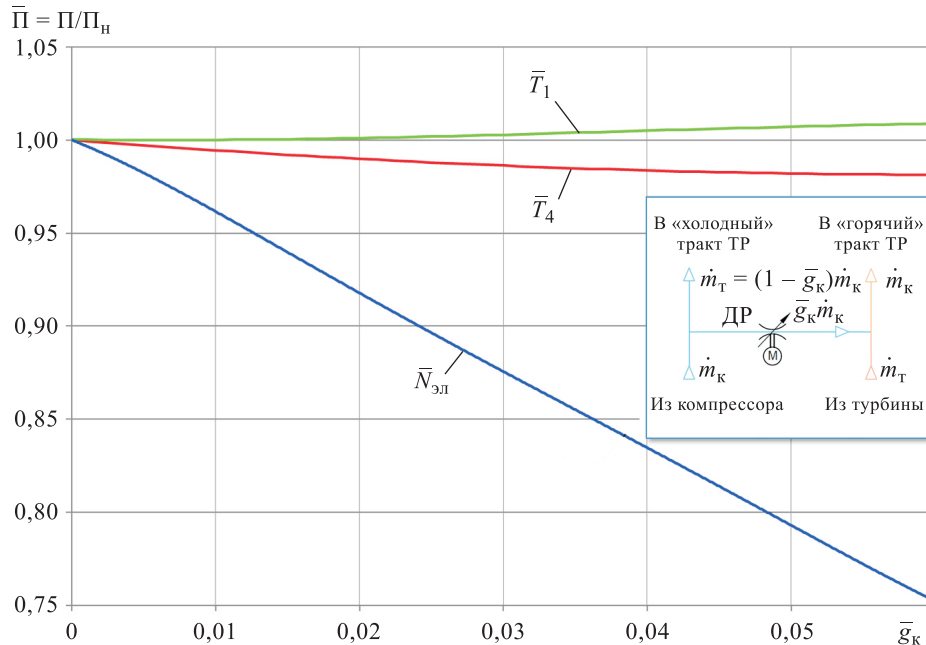


Рис. 8. Влияние величины перепуска рабочего тела через байпасную магистраль на параметры ЗГТУ при $N_{\text{реак}} = \text{const}$

Данные на рис. 8 свидетельствуют о существенном влиянии величины перепуска рабочего тела по байпасной магистрали на выходную электрическую мощность ЗГТУ. Так, увеличение \bar{g}_k до 0,05 (расход через байпасную магистраль, который идет мимо турбины, составляет 5 % от расхода через компрессор) приводит к снижению выходной электрической мощности более чем на 20 %. Такой характер влияния параметра \bar{g}_k связан с тем, что наряду с уменьшением расхода рабочего тела через турбину одновременно повышается температура на входе в компрессор и снижается температура на входе в турбину, что в соответствии с формулами (7)–(9) ведет к уменьшению выходной электрической мощности ЗГТУ.

Влияние потока солнечного излучения q_S , падающего на поверхность холодильника-излучателя, на выходную электрическую мощность ЗГТУ, а также на температуру рабочего тела перед компрессором и турбиной, показано на рис. 9. Изменение величины q_S может быть связано, например, с изменением ориентации ХИ относительно Солнца в процессе межорбитального перелета. Значения

параметров, как и на рис. 8, приведены в безразмерном виде, только здесь номинальные значения взяты для $q_S = 1380 \text{ Вт/м}^2$, соответствующей перпендикулярному положению поверхности холодильника-излучателя относительно потока солнечного излучения.

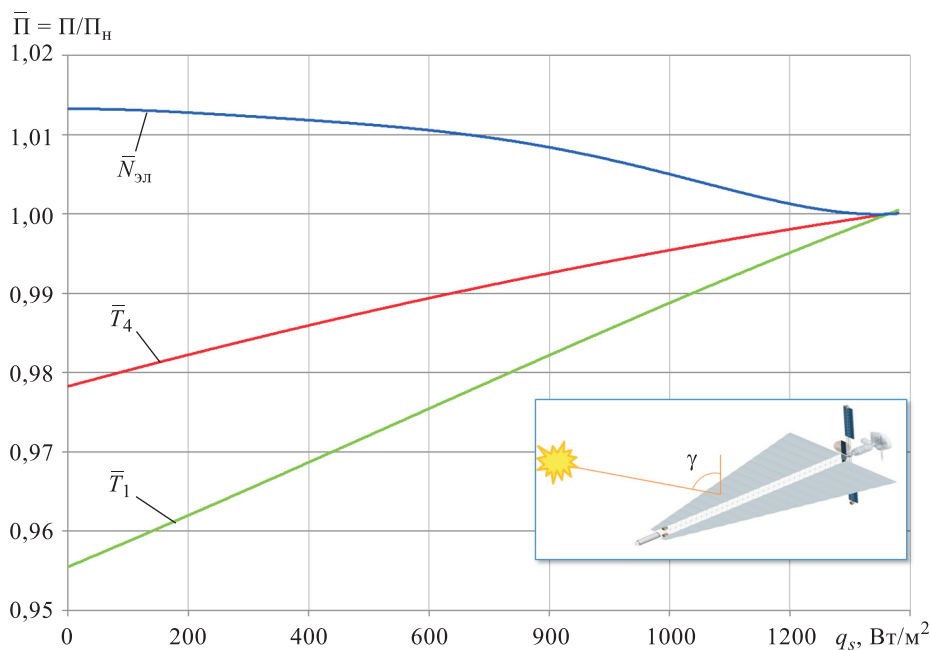


Рис. 9. Влияние потока солнечного излучения, падающего на поверхность холодильника-излучателя, на параметры ЗГТУ при $N_{реак} = \text{const}$

Данные, приведенные на рис. 9, показывают достаточно слабое влияние величины q_S на выходную электрическую мощность ЗГТУ. Так, при снижении q_S с 1380 Вт/м^2 до нуля выходная электрическая мощность ЗГТУ увеличивается не более чем на 1,5 %. Это связано с тем, что при снижении температуры T_1^* , приводящей, в соответствии с формулой (7), к снижению потребляемой мощности компрессора, также уменьшается и температура T_4^* , что, в соответствии с формулой (8), влечет за собой снижение вырабатываемой мощности турбины. В результате выходная электрическая мощность ЗГТУ, определяемая согласно формуле (9) разностью между мощностями турбины и компрессора, меняется незначительно.

Заключение. Для определения параметров замкнутых газотурбинных установок космического назначения на различных режимах работы предложена методика поверочного расчета, в основе которой лежит алгоритм нахождения условий совместной работы турбины

и компрессора в составе замкнутого контура преобразования энергии, с последующим уточнением температуры рабочего тела на входе в компрессор.

Поверочный расчет ЗГТУ заключается в нахождении общей рабочей точки турбины и компрессора при их работе в замкнутом контуре и определении параметров агрегатов ЗГТУ в этой точке. Для того чтобы определить температуру рабочего тела ЗГТУ перед компрессором, дополнительно рассматриваются условия обеспечения баланса между тепловой мощностью, отводимой от ЗГТУ в теплообменнике-холодильнике в контур холодильника-излучателя, и тепловой мощностью, сбрасываемой холодильником-излучателем в окружающее пространство.

Рассмотренные основные положения методики поверочных расчетов замкнутых газотурбинных установок космического назначения реализованы в программе для ЭВМ, разработанной в АО ГНЦ «Центр Келдыша». Данная программа, предоставляющая достаточно широкие возможности по заданию исходных данных и опций расчета, может быть использована для определения параметров ЗГТУ на различающихся требованиях по вырабатываемой электрической мощности установившихся режимах, для оценки влияния эксплуатационных разбросов характеристик и конструктивных особенностей агрегатов на выходные параметры ЗГТУ, для моделирования некоторых нештатных ситуаций, а также для планирования режимов функциональных испытаний при проведении экспериментальной отработки ЗГТУ и ее агрегатов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Акимов В.Н., Коротеев А.А., Коротеев А.С. Ядерная космическая энергетика: вчера, сегодня, завтра. *Известия РАН. Энергетика*, 2012, № 1, с. 3–11.
- [2] Коротеев А.С., Ошев Ю.А., Попов С.А., Каревский А.В., Солодухин А.Е., Захаренков Л.Э., Семёнкин А.В. Ядерная энергодвигательная установка космического аппарата. *Известия РАН. Энергетика*, 2015, № 5, с. 45–59.
- [3] Коротеев А.С., Акимов В.Н., Попов С.А. Проект создания транспортно-энергетического модуля на основе ядерной энергодвигательной установки мегаваттного класса. *Общероссийский научно-технический журнал «По-лет»*, 2011, № 4, с. 93–99.
- [4] *Prometheus Project Final Report*. National Aeronautics and Space Administration, Jet Propulsion Laboratory, CA Pasadena 982-R120461, 2005.
- [5] McGuire M.L., Martini M.C., Packard T.W., Weglian, J.E., Gilland J.H. Use of high-power Brayton nuclear electric propulsion (NEP) for a 2033 Mars round-trip mission. *AIP Conference Proceedings*, 2006, vol. 813, art. no. 222.
- [6] Овсянников Б.В., Боровский Б.И. *Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей*. Москва, Машиностроение, 1986, 376 с.
- [7] Холщевников К.В., Емин О.Н., Митрохин В.Т. *Теория и расчет авиационных лопаточных машин*. Москва, Машиностроение, 1986, 432 с.
- [8] Иванов В.Л., Леонтьев А.И., Манушин Э.А., Осипов М.И. *Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных*

- установок. Леонтьев А.И., ред. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004, 592 с.
- [9] Грязнов Н.Д., Епифанов В.М., Иванов В.Л., Манушин Э.А. *Теплообменные устройства газотурбинных и комбинированных установок*. Москва, Машиностроение, 1985, 360 с.
- [10] Фаворский О.Н., Каданер Я.С. *Вопросы теплообмена в космосе*. Москва, Высшая школа, 1972, 280 с.

Статья поступила в редакцию 20.05.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Каревский А.В., Штонда С.Ю. Методика поверочных расчетов параметров замкнутых газотурбинных установок космического назначения. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 5.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-5-2178>

Каревский Андрей Владимирович — канд. техн. наук, начальник отдела АО ГНЦ «Центр Келдыша». Область научных интересов: космическая энергетика, системы преобразования энергии. e-mail: 101310-1@kerc.msk.ru

Штонда Сергей Юрьевич — инженер 2-й категории АО ГНЦ «Центр Келдыша». Область научных интересов: космическая энергетика, системы преобразования энергии. e-mail: 101310-1@kerc.msk.ru

Methodology for checking calculations of parameters of space purpose closed-loop gas turbine units

© A.V. Karevskiy, S.Yu. Shtonda

Keldysh Research Center, Moscow, 125438, Russia

The paper considers the methodology for checking calculations of parameters of space purpose closed-loop gas turbine units in various operating modes and changeable external conditions. The methodology is based on an algorithm for finding the conditions for the turbine-compressor joint operation in the energy conversion closed loop with subsequent clarification of the temperature of the working fluid at the inlet to the compressor. Finding the common operating point of the turbine and compressor is possible through using their universal flow-pressure characteristics obtained experimentally or calculated by the similarity methods of bladed machines. To clarify the temperature of the working fluid in front of the compressor, we also considered the conditions for ensuring a balance between the thermal power removed to the radiant cooler loop and the thermal power discharged by the radiant cooler into environment. The study briefly describes the software which implements the methodology and introduces the results of test calculations.

Keywords: closed-loop gas turbine unit, calculation method, Brayton cycle, radiant cooler

REFERENCES

- [1] Akimov V.N., Koroteev A.A., Koroteev A.S. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika — Thermal Engineering*, 2012, no. 1, pp. 3–11.
- [2] Koroteev A.S., Oshev Yu.A., Popov S.A., Karevskiy A.V., Solodukhin A.E., Zakharenkov L.E., Seminkin A.V. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika — Thermal Engineering*, 2015, no. 5, pp. 45–59.
- [3] Koroteev A.S., Akimov V.N., Popov S.A. *Obshcherossiyskiy nauchno-tekhnicheskii zhurnal «Polyot» — All-Russian scientific and technical journal “Polyot” (Flight)*, 2011, no. 4, pp. 93–99.
- [4] *Prometheus Project Final Report*. National Aeronautics and Space Administration, Jet Propulsion Laboratory, CA Pasadena 982-R120461, 2005.
- [5] McGuire M.L., Martini M.C., Packard T.W., Weglian, J.E., Gilland J.H. Use of high-power Brayton nuclear electric propulsion (NEP) for a 2033 Mars round-trip mission. *AIP Conference Proceedings*, 2006, vol. 813, art. no. 222.
- [6] Ovsyannikov B.V., Borovskiy B.I. *Teoriya i raschet agregatov pitaniya zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Theory and calculation of power units for liquid propellant rocket engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986, 376 p.
- [7] Holshechnikov K.V., Emin O.N., Mitrokhin V.T. *Teoriya i raschet aviatsionnykh lopatochnykh mashin* [Theory and calculation of aircraft impeller machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986, 432 p.
- [8] Ivanov V.L., Leontev A.I., Manushin E.A., Osipov M.I. *Teploobmennye apparaty i sistemy okhlazhdeniya gazoturbinnnykh i kombinirovannykh ustanovok* [Heat exchangers and cooling systems for gas turbine and combined units]. Moscow, BMSTU Publ., 2004, 592 p.
- [9] Gryaznov N.D., Epifanov V.M., Ivanov V.L., Manushin E.A. *Teploobmennye ustroystva gazoturbinnnykh i kombinirovannykh ustanovok* [Heat exchangers for gas turbine and combined units]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985, 360 p.
- [10] Favorskiy O.N., Kadaner Ya.S. *Voprosy teploobmena v kosmose* [Issues of heat transfer in space]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1972, 280 p.

Karevskiy A.V., Cand. Sc. (Eng.), Head of Department, Keldysh Research Center. Research interests: space power, power conversion systems.
e-mail: 101310-1@kerc.msk.ru

Shtonda S.Yu., 2nd category engineer, Keldysh Research Center. Research interests: space power, power conversion systems. e-mail: 101310-1@kerc.msk.ru