

УДК 629.78; 621.039

**Общая методика расчета энергоблока стендового варианта ядерной  
энергодвигательной установки космического назначения  
на переходных режимах работы**

**Чернаков В.В.<sup>1</sup>, Иксанов Х.С.<sup>2</sup>, Мякочин А.С.<sup>1</sup>, Назаренко И.П.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

<sup>2</sup>*Исследовательский центр имени М.В. Келдыша, ГНЦ Центр Келдыша, Онежская ул., 8, Москва, 125438, Россия*

**Аннотация**

В статье приведен принцип построения общей методики расчета энергоблока стендового варианта ядерной энергодвигательной установки космического назначения на переходных режимах работы, которая основана на комплексной физико-математической модели энергоустановки. Определен набор независимых переменных и параметров, характеризующих нестационарные режимы энергоустановки. Приведена общая схема физико-математической модели, описан алгоритм расчета параметров замкнутого газотурбинного контура на примере стендового варианта.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, газотурбинный контур, цикл Брайтона, космическая ядерная энергоустановка.

## Введение

Создание космических ядерных энергодвигательных установок (КЯЭУ) является важнейшей задачей для освоения космического пространства при значительном удалении от Земли. Работы по созданию КЯЭУ ведутся в США [1], западной Европе [2, 3], Бразилии [4] и в России [5 - 17].

Космические ядерные энергодвигательные установки (рис. 1) в теории позволяют получать высокий уровень энергодвигательного обеспечения и решать важнейшие задачи в космосе [5, 6, 7].

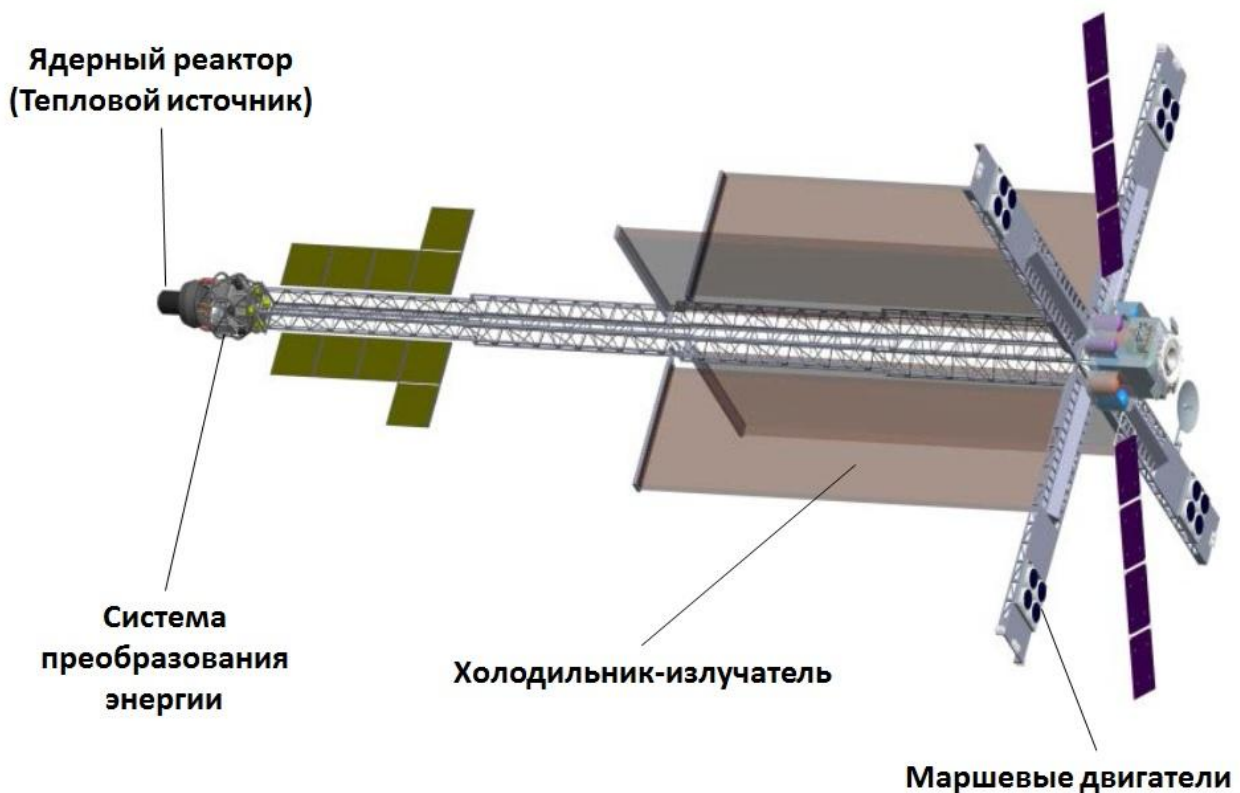


Рисунок 1 – Внешний вид космической ядерной энергодвигательной установки [5, 6, 7]

Космическая ядерная энергодвигательная установка, как правило [18], состоит из следующих составных частей (Рис. 2):

- энергоблок, включающий в себя:
  - источник тепла (реактор);
  - система преобразования тепловой энергии в электрическую (газотурбинное преобразование);
  - система отвода тепла из системы преобразования энергии (холодильники-излучатели);
- двигательная установка (блоки электроракетных двигателей).

Одной из задач, решение которой необходимо для создания КЯЭУ, является расчет переходных режимов её работы на этапе запуска и при переходе с режима на режим [19] с целью выработки алгоритмов управления. В данной работе рассматривается задача создания методики расчета с помощью физико-математической модели энергоблока, которая позволяла бы рассчитывать параметры контура преобразования энергии КЯЭУ на нестационарных режимах, темп нагрева контура КЯЭУ при различных начальных параметрах.

В систему преобразования тепловой энергии в электрическую входят (рис. 2): турбогенератор-компрессор, теплообменник-рекуператор (ТР), возвращающий часть тепла для повторного использования в цикле, и теплообменник-холодильник, являющийся связующим звеном с системой отвода тепла (через него обеспечивается отвод в окружающее пространство той части тепла, которая не может быть превращена в полезную работу).

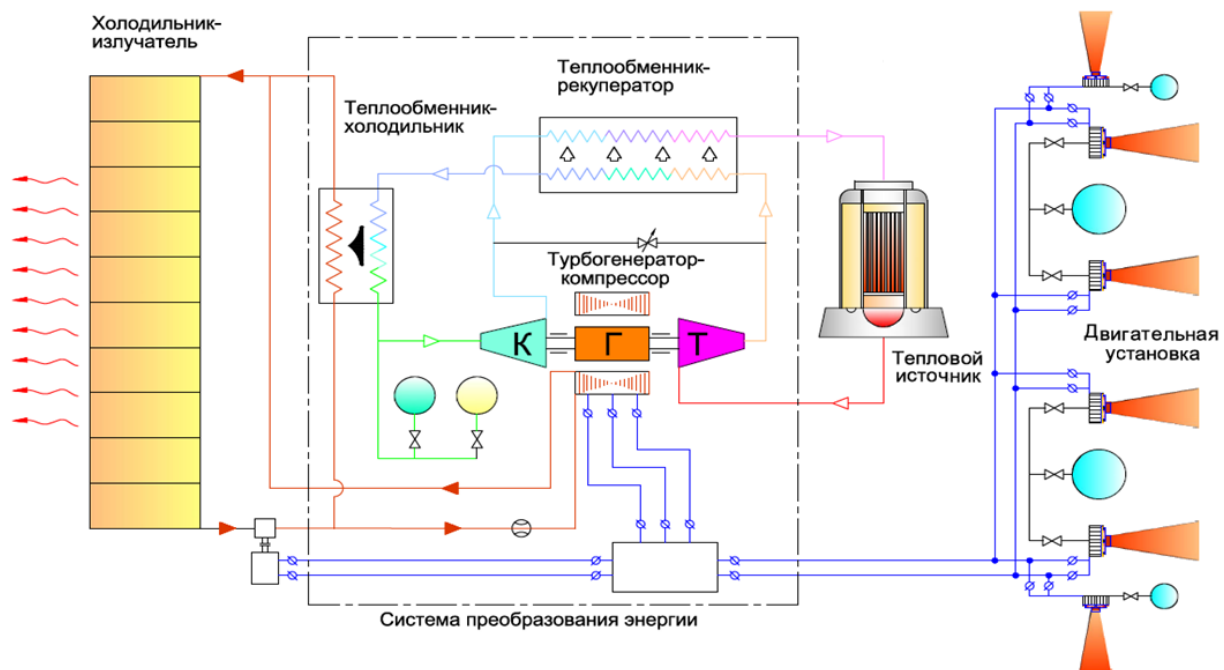


Рисунок 2 – Принципиальная схема КЯЭУ [6, 7]

В данной статье представлена общая методика расчета на примере наземного стендового варианта энергоустановки с одним контуром преобразования энергии и тепловым имитатором реакторной установки (ТИРУ) в качестве источника тепловой энергии [17].

Целью физико-математического моделирования работы замкнутого газотурбинного контура (ЗГТК) в нестационарной постановке является определение всех важнейших параметров работы энергоустановки в динамике по конкретному набору независимых переменных (параметров, задаваемых «извне»). Дополнительной задачей является определение минимального набора независимых переменных, по которому можно полностью охарактеризовать работу энергоустановки в нестационарных режимах.

### Независимые параметры:

- размерные характеристики всех составных элементов энергоустановки;
- фазный ток в ТИРУ;
- реальные теплофизические характеристики рабочего тела (аргона в наземном стендовом варианте энергоустановки);
- реальные физические характеристики материалов всех составных элементов энергоустановки;
- частота вращения ротора турбокомпрессора-генератора в моторном режиме.

Чтобы в полной мере охарактеризовать нестационарный режим, необходимо решить следующие задачи:

- определение температурных полей и давлений в ЗГТК;
- определение массового расхода газообразного рабочего тела (РТ) по контуру и, в том числе, части массового расхода через лабиринтные уплотнения турбокомпрессора - генератора (ТКГ);
- определение полного КПД, напорной характеристики и потребляемой мощности центробежного компрессора;
- определение выходной мощности центростремительной турбины с учетом полного КПД ступени;
- определение величины теплового потока, передаваемого от «горячего» тракта «холодному» в теплообменнике - рекуператоре;
- определение величины теплового потока, отводимого от контура в теплообменнике - холодильнике;

- определение количества тепла в единицу времени, поступающего в ЗГТК от ТИРУ; определение суммарной электрической мощности, потребляемой ТИРУ от электрической сети;
- определение тепловых и гидравлических потерь по трактам ЗГТК;
- определение массы рабочего тела в контуре и его распределение по трактам высокого и низкого давления;
- определение величины избыточного крутящего момента на валу ротора ТКГ, определение момента времени для перехода контура в генераторный режим работы;
- определение потребной величины электрической балластной нагрузки для стабилизации частоты вращения ротора ТКГ на заданном значении;
- оценка величины электропотребления от системы обеспечения запуска при запуске контура до выхода в генераторный режим работы;
- учёт изменения реальных теплофизических свойств теплоносителей и материалов в зависимости от локальной температуры с целью повышения достоверности результатов.

### **Общая схема модели**

Физико-математическая модель замкнутого газотурбинного контура (ЗГТК) строится по модульному принципу (каждый модуль может использоваться и отдельно) и основывается на следующих основных физико-математических моделях:

- физико-математическая модель центробежного компрессора;
- физико-математическая модель центростремительной турбины;
- физико-математическая модель теплообменника – рекуператора [20, 21];
- физико-математическая модель теплообменника – холодильника [20, 21];
- физико-математическая модель изделия теплового имитатора реакторной установки в качестве источника тепла [22];
- физико-математическая модель нетеплоизолированного трубопровода;
- физико-математическая модель теплоизолированного трубопровода.

Кроме того в состав физико-математической модели ЗГТК входят следующие модули общего расчетно-математического обеспечения:

- определение теплофизических характеристик теплоносителя в зависимости от заданных значений температуры и давления;
- определение реальных теплофизических и электрических характеристик конструкционного материала в зависимости от заданного значения температуры;
- определение потерь давления по газодинамическому тракту в зависимости от характеристик потока, реальных теплофизических свойств теплоносителя, геометрии тракта, характеристик шероховатости конструкционного материала тракта;
- модуль расчета коэффициента теплоотдачи на границе раздела двух сред в зависимости от характеристик потока теплоносителя, его теплофизических свойств, геометрии и температуры стенок проточного тракта;

- модуль линейной интерполяции функций одной и двух переменных;
- модуль определения интервала интерполирования;
- модуль поиска корня нелинейного уравнения на заданном интервале.

### **Алгоритм расчета параметров замкнутого газотурбинного контура**

Алгоритм расчета параметров замкнутого контура в нестационарной постановке представляет собой циклический процесс расчетов по временным слоям с шагом дискретизации по времени  $\Delta t$ . В пределах шага дискретизации рассчитанные параметры контура считаются неизменными (квазистационарными).

Для каждого временного слоя при этом решается краевая задача с распределенными параметрами. В разностной постановке система с распределенными параметрами заменяется детерминированной системой.

Граничные условия:  $P(0) = P(L) = P_0^*$ .

Значение полного давления  $P_T$  в начальной точке контура должно равняться значению полного давления в конечной точке контура (для замкнутого контура, естественно, начальная и конечная точка – это одна и та же точка).

Другими словами, на данном временном слое, задаваясь значением полного давления  $P_T$  в начальной точке контура, по окончании расчетов по определению полей давлений и температурных полей в составных частях контура в конечной точке контура должно получиться то же самое значение.



В качестве начальной точки расчета замкнутого контура выбрана точка входа потока РТ в ступень компрессора. Блок - схема логики расчета параметров замкнутого контура представлена на рис. 3.

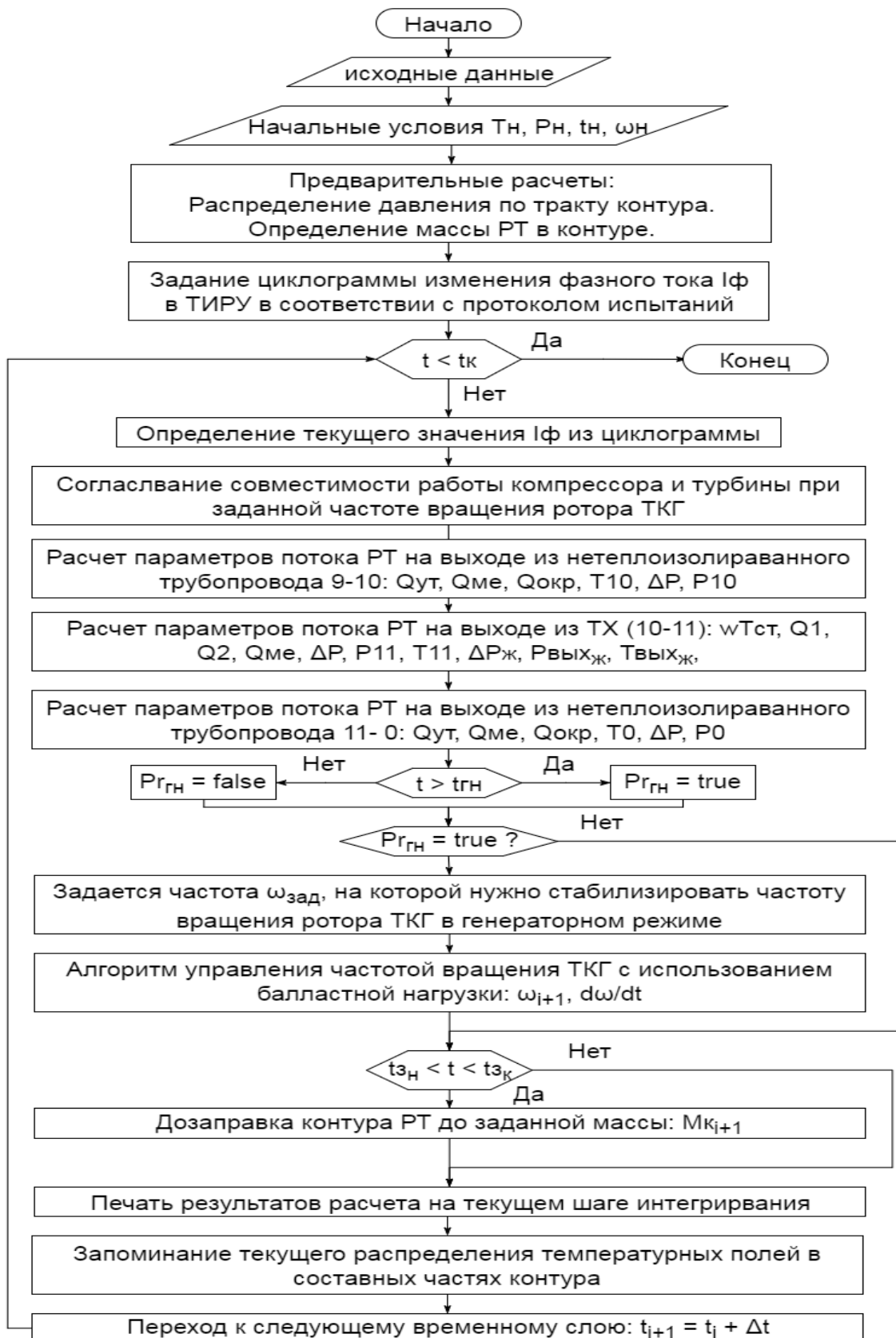


Рисунок 3 – Схема расчета параметров замкнутого контура стендового варианта КЯЭУ

Обозначения на блок – схеме:

$T_H$  – начальная температура РТ в контуре, К;

$P_H$  – начальное давление заправки контура РТ, Па;

$t_H$  – начальное время расчета (определяется моментом времени запуска в моторном режиме контура экспериментальной установки), с;

$\omega_H$  – начальная частота вращения ротора ТКГ, Гц;

$\omega$  – текущая частота вращения ротора ТКГ, Гц;

$t_K$  – конечное время расчета, с;

$I_\phi$  – значение фазного тока, «подаваемое» в ТИРУ, А;

$Q_{ут}$  – количество тепла, теряемое при прохождении потока РТ по элементу контура, Вт;

$Q_{ме}$  – количество тепла, уходящее на разогрев конструкционного материала элемента контура, Вт;

$Q_{окр}$  – количество тепла, отданного в окружающую среду с поверхности элемента контура в результате конвективного теплообмена, Вт;

$\Delta P$  – потери полного давления в элементе контура, Па;

$T_x$  – полная температура потока РТ в точке  $x$  контура, К;

$P_x$  – полное давление потока РТ в точке  $x$  контура, Па;

$wT_{CT}$  – массив распределения температурного поля по длине теплообменной пластины в ТР (ТХ), К;

$Q_1$  – количество тепла в единицу времени, отдаваемое «горячим» трактом ТР (ТХ), Вт;

$Q_2$  – количество тепла в единицу времени, получаемое «холодным» трактом ТР (ТХ), Вт;

$\Delta P_{ж}$  – потери полного давления жидкого теплоносителя при прохождении ТХ, Па;

$P_{ВЫХ_{ж}}$  – полное давление жидкого теплоносителя на выходе из ТХ, Па;

$T_{ВЫХ_{ж}}$  – полная температура жидкого теплоносителя на выходе из ТХ, К;

$t_{ГН}$  – время перехода на режим генерации, с;

$Pr_{ГН}$  – переключатель расчета в режим генерации;

$\omega_{зад}$  – заданная частота вращения ротора ТКГ, Гц;

$\omega_{i+1}$  – частота вращения ротора ТКГ на следующем временном слое, Гц;

$\frac{d\omega}{dt}$  – скорость изменения частоты вращения ротора ТКГ, Гц/с;

$t_{3_{Н}}, t_{3_{К}}$  – начальное и конечное время дозакорректировки контура, с;

$M_{k_{i+1}}$  – масса РТ в контуре на следующем временном слое, кг;

$t_{i+1}$  – время следующего временного слоя, с;

$t_i$  – время текущего временного слоя, с;

$\Delta t$  – шаг интегрирования по времени, с.

### Описание алгоритма

1) В каждый фиксированный момент времени  $t_i$  по циклограмме определяется среднее значение фазного тока в ТИРУ, определяющее степень нагрева рабочего тела, проходящего через имитатор. Циклограмма изменения фазного тока в ТИРУ по времени составляется на основании имеющихся экспериментальных данных по испытаниям стендового варианта КЯЭУ, либо по требуемым мощностным параметрам.

2) Для моторного режима по циклограмме изменения частоты вращения ротора ТКГ выбирается значение частоты вращения, соответствующее данному моменту времени. Для генераторного режима частота вращения определяется алгоритмом управления частотой вращения ротора ТКГ (в качестве управляющего воздействия алгоритм использует вариацию электрической мощности подключаемой балластной нагрузки).

3) Для определения массового расхода РТ по контуру используется алгоритм согласования совместной работы компрессора и турбины при заданной частоте

вращения ротора ТКГ. В результате работы данного алгоритма определяются следующие основные характеристики:

- перепад давления на ступени компрессора;
- массовый расход РТ по контуру;
- потребляемая мощность и КПД компрессора;
- вырабатываемая мощность и КПД турбины;
- тепловая и электрическая мощность ТИРУ [22];
- тепловая мощность теплообменника - рекуператора [20, 21];
- тепловые и гидравлические потери в трубопроводах тракта высокого давления контура;
- распределение температурных полей и полей давлений в тракте высокого давления контура;
- мощность крутящего момента на валу ротора ТКГ.

4) Используя физико-математическую модель нетеплоизолированного трубопровода, а также физико-математическую модель теплообменника - холодильника [20, 21], определяем параметры потока РТ на входе в центробежный компрессор. При этом определяются следующие основные характеристики:

- количество тепла в единицу времени, передаваемое теплообменником - холодильником для дальнейшей утилизации в тепловом имитаторе системы отвода тепла;
- тепловые и гидравлические потери в трубопроводах тракта низкого давления контура;

– распределение температурных полей и полей давлений в тракте низкого давления контура.

5) Проверяется выполнение граничных условий: параметры потока РТ в начальной точке расчета контура должны совпадать с параметрами потока РТ в конечной точке расчета контура (в пределах заданной точности). При невыполнении граничных условий значение полного давления в начальной точке расчета контура корректируется и проводится следующая итерация расчета параметров контура на данном временном слое.

6) Проверяются условия перехода контура в генераторный режим работы. Признак генерации  $Pr_{гн}$  (рис. 3) принимает логическое значение true, если все условия для перехода в режим генерации выполнены, в противном случае – false.

7) Проверяется логическое значение признака генераторного режима работы контура  $Pr_{гн}$ . В испытаниях, если контур работает в моторном режиме, то частота вращения ротора ТКГ задается от системы обеспечения запуска. Если в генераторном – то частоту вращения ротора регулирует алгоритм управления частотой вращения ротора ТКГ. При этом в алгоритм вводится значение частоты  $\omega_{зад}$ , на которой требуется стабилизировать частоту вращения ротора ТКГ в генераторном режиме работы. В качестве управляющего воздействия алгоритм использует вариацию электрической мощности подключаемой балластной нагрузки. Для выработки управляющего сигнала (так называемый ПИ-регулятор) алгоритм использует текущее значение частоты  $\omega_i$  (пропорциональное звено), а также её

первую производную по времени  $\frac{d\omega}{dt}$ , усредненную на некотором временном интервале (дифференцирующее звено).

8) Проверяются условия необходимости и возможности виртуальной дозаправки контура массой РТ. В случае положительного результата проверки тракты контура виртуально дозаправляются РТ до заданного значения массы контура.

9) Вывод результатов расчета для данного временного слоя.

10) Запоминание текущего распределения температурных полей в составных частях контура во вспомогательных массивах.

11) Переход к следующему временному слою.

### **Заключение**

В работе представлено описание общей методики расчета газотурбинного контура преобразования энергии применительно к стендовому варианту энергоустановки космического назначения на переходных режимах работы. Методика основана на комплексной физико-математической модели энергоустановки. Данная методика может изменяться и дополняться в зависимости от компоновки и конструктивной схемы конкретной энергоустановки, характеристик и особенностей её составных частей, типа теплообменных аппаратов, типа теплового источника и т.д.

Данная методика может быть использована для выполнения расчетов при разработке, проектировании и оценке эффективности космических ядерных



энергоустановок, а также при моделировании и обработке алгоритмов управления контуром преобразования энергии на режимах изменения тепловой мощности источника.

### **Библиографический список**

1. Lee S. Mason. A Power Conversion Concept for the Jupiter Icy Moons Orbiter, First // AIAA/ASME/IEEE International Energy Conversion Engineering Conference, Portsmouth, Virginia, August 17–21, 2003, pp. 6 – 15.
2. Jansen F., Bauer W., Masson F., Ruault J.M., Worms J.C., Detsis E., Lassoudiere F., Granjon R., Gaia E., Ferraris S., Tosi M.C., Koroteev A.S., Semenkin A.V., Solodukhin A.E., Tinsley T., Hodgson Z., Guimarães L.N.F. Step-by-step Realization of the International Nuclear Power and Propulsion System (INPPS) mission // Proceedings Of The International Astronautical Congress, IAC, Jerusalem, Israel, 2015, pp. 7716 - 7724.
3. Oriol S., Masson F., Tinsley T., Stainsby R., Hodgson Z., Detsis E., Worms J.C., Koroteev A.S., Semenkin A.V., Solodukhin A.E., Jansen F., Bauer W., Bauer W., Ferraris S., Tosi M.C., Muszynski M., Lassoudiere F. DEMOCRITOS: development logic for a demonstrator preparing nuclear electric spacecraft // Nuclear and Emerging Technologies for Space (NETS 2016), 2016, pp. 50-60.
4. Lamartine Guimarães, Guilherme Borges Ribeiro, Jamil Alves do Nascimento, Élvis Falcão de Araújo, Francisco Antônio Braz Filho, Artur Flávio Dias and Valeria S.F.O. Leite. TERRA Project: a Brazilian View for Nuclear Energy Application to Space Exploration, NETS 2017 // *Conference Paper*, February 2017, <https://www.researchgate.net/publication/315658469>

5. Коротеев А.С., Акимов В.Н., Попов С.А. Проект создания транспортно-энергетического модуля на основе ядерной энергодвигательной установки мегаваттного класса // Полет. 2011. № 4. С. 93 - 99.
6. Акимов В.Н., Коротеев А.С. Ядерная энергетика: вчера, сегодня, завтра // Современная наука. 2011. № 2 (7). С. 77 - 85.
7. Коротеев А.С. Новый этап развития космической энергетики // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 4. С. 317 - 322.
8. 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 Российской академии наук. Энергетика. 2015. № 5. С. 45 - 59.
9. Кувшинова Е.Ю. Методика определения оптимальной траектории перелета с малой тягой между околоземной и окололунной орбитами // Труды МАИ. 2013. № 68. URL: <http://trudy.mai.ru/published.php?ID=41742>
10. Рыбин В.В. Моделирование САУ ядерной энергетической установкой в СКМ спектральным методом // Труды МАИ. 2012. № 50. URL: <http://trudy.mai.ru/published.php?ID=28987>
11. Волчков Г.В., Выставкин А.Г. Космическая ядерная энергетическая установка с паротурбинным преобразованием энергии // Труды МАИ. 2011. № 45. URL: <http://trudy.mai.ru/published.php?ID=25364>
12. Лёб Х.В., Могулкин А.И., Обухов В.А., Петухов В.Г. Анализ многоразового лунного транспортного корабля, использующего ядерную энергетическую

установку // Труды МАИ. 2013. № 70. URL:  
<http://trudy.mai.ru/published.php?ID=44497>

13. Полоус М.А., Алексеев П.А., Ехлаков И.А. Современные расчетные технологии обоснования характеристик ядерных электродвигательных установок в проектных работах создания термоэмиссионных космических ядерных энергетических установок нового поколения // Труды МАИ. 2013. № 68. URL:  
<http://trudy.mai.ru/published.php?ID=41822>

14. Константинов М.С., Лёб Х.В., Петухов В.Г., Попов Г.А. Проектно-баллистический анализ пилотируемой марсианской миссии с ядерной электроракетной двигательной установкой // Труды МАИ. 2011. № 42. URL:  
<http://trudy.mai.ru/published.php?ID=24274>

15. Акимов В.Н., Архангельский Н.И., Елисеев И.О., Коротеев А.С., Кувшинова Е.Ю. Использование буксира с ядерной электроракетной двигательной установкой для реализации перспективной лунной программы на базе ракет-носителей «Ангара» // Полет. 2015. № 7. С. 3 - 9.

16. Barabanov A.A., Pichkhadze K.M., Sysoev V.K., Papchenko B.P., Rebrov S.G., Semenkin A.V., Yanchur S.V. Proposals For The Construction Of Space Systems Based On Small Spacecraft And A Transport And Power Module With A Nuclear Power Plant // Solar System Research, 2016, no 7, pp. 471 - 476.

17. Андрианов Д.И., Захаренков Л.Э., Каревский А.В., Попов А.В., Попов С.А., Семёнкин А.В., Солодухин А.Е., Терехов Д.Н., Штонда С.Ю. Мощные энергодвигательные установки космического назначения с газотурбинным преобразованием энергии по замкнутому циклу Брайтона и особенности их

экспериментальной отработки // Инженерный журнал: наука и инновации. 2016. № 7(55). С. 9. DOI 10.18698/2308-6033-2016-07-1518

18. Фаворский О.Н, Фишгойт В.В., Янтовский Е.И. Основы теории космических электрореактивных двигательных установок – М.: Высшая школа, 1978. – 384 с.

19. Чернаков В.В., Иксанов Х.С. Математическое моделирование космической энергоустановки на основе замкнутого газотурбинного цикла Брайтона на переходных режимах работы // XLI Академические чтения по космонавтике. Сборник тезисов. Москва, 24 – 27 января 2017, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 565 с.

20. Иксанов Х.С., Цветкова А.И., Чернаков В.В. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ «Программа нестационарного расчета параметров в теплообменных аппаратах пластинчатого типа», № 2015661504, 29.10.2015.

21. Чернаков В.В., Иксанов Х.С. Математическая модель нестационарного теплообмена в пластинчатом теплообменном аппарате противоточной схемы движения теплоносителей // Тепловые процессы в технике. 2017. Т. 9, № 3. С. 98 - 105.

22. Цой М.М., Катунин Н.В. Расчет переходных режимов в тепловом имитаторе реакторной установки экспериментальной установки турбомашинного преобразования тепловой энергии в электрическую // VIII Международная конференция по математическому моделированию. Тезисы докладов. Якутск, 2017, 220 с.