

МАКЕТНЫЙ ОБРАЗЕЦ ДВУХПЕТЛЕВОЙ ЗАМКНУТОЙ ГАЗОТУРБИННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ МОЩНОСТЬЮ 10 кВт

Представлены результаты оптимизации цикла замкнутой газотурбинной энергетической установки мощностью 10 кВт с электрическим нагревателем, используемым в качестве источника теплоты. Приведены результаты расчетов узлов и агрегатов, входящих в состав макетного образца двухпетлевой замкнутой газотурбинной установки. Проанализирована конструкция и компоновочные решения, необходимые для оптимального расположения макетного образца в ограниченном по габаритам помещении. Предложены варианты компоновочных решений.

E-mail: novitskiybronislav@gmail.com

Ключевые слова: замкнутая газотурбинная энергетическая установка, макетный образец, многопетлевая ЗГТУ.

В настоящее время потребность в энергообеспечении космических аппаратов достигла критических значений для солнечных батарей и электрических аккумуляторов, поэтому актуальным является создание работающих длительное время энергоустановок большой мощности с высокими удельными характеристиками (до 12 кг/кВт).

Достижение таких параметров возможно только при использовании машинных преобразователей энергии с замкнутым контуром, к которым относятся паромашинные и паротурбинные установки, двигатели Стирлинга и газотурбинные установки. Для агрегатных мощностей в диапазоне значений 50...5 000 кВт наиболее приемлемыми являются замкнутые газотурбинные установки (ЗГТУ). Однако для создания этих установок требуется не только понимание физических принципов работы ЗГТУ и математическое моделирование процессов, происходящих в ней, но и проведение испытаний подобных установок и их критических узлов для получения экспериментальных данных. Отсутствие таких данных и полноты информации о процессах, протекающих в узлах установки, приводят к тому, что разработка полномасштабного агрегата становится весьма дорогостоящим и долговременным процессом, особенно если это связано с исследованием переходных процессов при разгоне и торможении установки, ее запуске и останове. Большое количество взаимозависимых факторов зачастую делает невозможным проведение математического моделирования и прогнозирование поведения установки в реальных условиях.

Для выявления основных закономерностей в переходных процессах и зависимостей параметров на основных режимах работы целесообразно изучать уменьшенные копии объектов, используя методы анализа размерностей и теорию подобия с учетом автомодельности процессов по отдельным определяющим критериям. Такие исследования существенно снижают стоимость, сокращают время создания и отработки натуральных объектов. В данной работе исследованы возможности создания макетного образца двухпетлевой ЗГТУ электрической мощностью 10 кВт, позволяющего моделировать многопетлевые ЗГТУ мощностью от десятков до сотен киловатт. Эти установки предназначены для питания электроракетных или тепловых с электрическим нагревом двигателей.

В процессе исследования макетного образца двухпетлевой ЗГТУ решен ряд задач, благодаря чему удалось определить основные параметры макетного образца, выполнить оптимизацию критических узлов и на этой базе разработать компоновку, в которой учтены конструктивные особенности этих узлов и условия симметрии.

Постановка задачи. На основе результатов многолетних работ, выполненных в НИИ Энергетического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана под руководством В.Л. Самсонова, по созданию замкнутых газотурбинных установок и отработке их критических узлов было сформулировано техническое задание на создание макетного образца с приведенными ниже основными параметрами:

Мощность (2 петли), кВт	10
Температура, К:	
перед турбиной	1073
перед компрессором	320
Рабочее тело — гелий-ксеноновая смесь, кг/кмоль	83,8
Частота вращения ротора, мин ⁻¹	24 000...50 000
Давление рабочего тела перед компрессором, МПа	0,11
Степень регенерации	0,95
Коэффициент сохранения полного давления в контуре	0,9

Макетный образец необходимо скомпоновать так, чтобы поместить стенд в лаборатории НИИ ЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана для решения следующих задач:

- исследование совместной работы двух газотурбинных преобразователей энергии в едином газовом контуре от общего нагревателя;
- организация совместной работы модулей ЗГТУ на номинальном режиме и отладка работы на режиме собственных нужд;
- изучение процессов пуска и останова модулей, а также выбор оптимального алгоритма управления пуском;
- исследование переходных процессов;
- построение алгоритма управления модулями ЗГТУ в переходных процессах;
- отработка аварийных и форсированных режимов работы установки;

– выявление принципиальных проблем в устройстве и конструкции установки.

Схема макетного образца. Цикл рекуперативной ЗГТУ (рис. 1) состоит из процессов изоэнтропного сжатия и расширения, изобарного подвода и отвода теплоты. Сжатие рабочего тела (гелий-ксеноновой смеси) происходит в центробежном компрессоре (К1, К2), на привод которого затрачивается часть работы турбины; далее рабочее тело подогревается в рекуператоре (Р) и затем нагревается в электронагревателе (НЭ) до 1073 К. Центростремительная турбина (Т1, Т2) реализует теплоперепад, производя работу, которая затрачивается на привод компрессора и генератора, преодоление механических потерь. Далее гелий-ксеноновая смесь охлаждается в рекуператоре, возвращая часть теплоты в цикл, а затем сбрасывает ее остатки в конечном холодильнике (КХ).

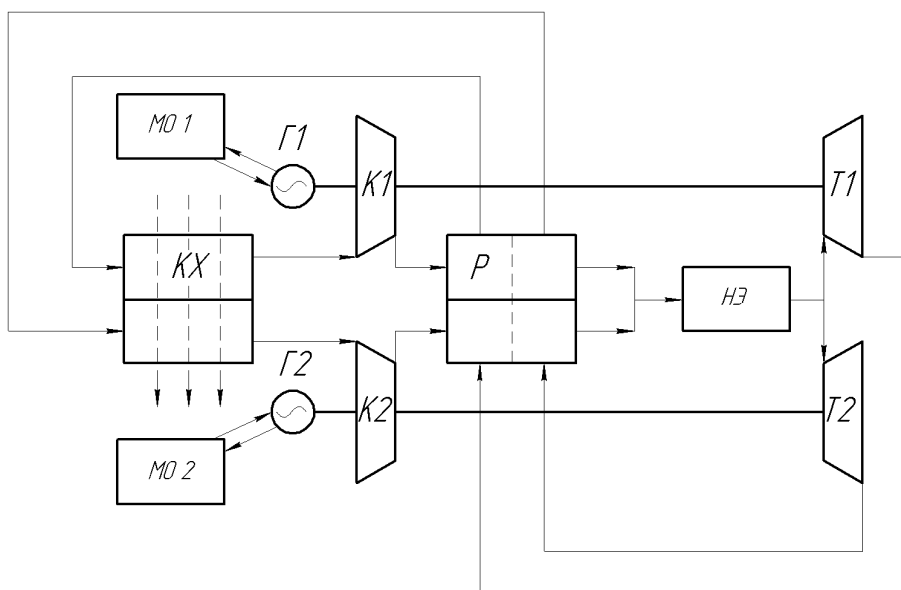


Рис. 1. Схема двухпетлевой замкнутой газотурбинной энергетической установки с общим конечным охладителем:

К1, К2 — компрессоры; Т1, Т2 — турбины; Р — рекуператор; МО 1, МО 2 — маслоохладители; НЭ — электронагреватель; КХ — конечный охладитель

Для размещения в лаборатории энергетической установки в двухпетлевом исполнении потребовалось изменить параметры при входе (температура перед компрессором была повышена для улучшения отвода теплоты от конечного охладителя). С этой целью проведены пересчет цикла и корректировка оптимальных параметров замкнутой газотурбинной установки.

Оптимизация цикла ЗГТУ выполнена с помощью известных зависимостей [1–4] для определения:

температуры торможения за компрессором

$$T_k^* = T_0 \left[1 + \left(\pi_k^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \frac{1}{\eta_k} \right],$$

где k — показатель адиабаты; η_k — ожидаемый КПД компрессора; T_0 — температура рабочего тела перед компрессором, К; π_k — степень повышения давления в компрессоре;

температуры торможения за турбиной

$$T_T^* = T_T \left[1 - \pi_T^{\frac{1-k}{k}} \right] \eta_T,$$

где η_T — ожидаемый КПД турбины; T_T — температура газа перед турбиной, К; π_T — степень понижения давления в турбине.

Техническим заданием ограничено минимальное значение коэффициента сохранения полного давления в контуре величиной 0,9, поэтому требуется уточнение величин гидравлических сопротивлений в трубопроводах, оценка которых проведена по методике [5] в соответствии с известной зависимостью

$$\Delta P = \frac{\rho V^2}{2} \xi_{\text{тр}} \frac{L}{d},$$

где L, d — длина и диаметр трубопровода, м; ρ — плотность газовой смеси, кг/м³; V — скорость рабочего тела, м/с; $\xi_{\text{тр}}$ — коэффициент трения.

В результате расчета цикла определены основные параметры двухпетлевой установки:

КПД цикла	0,341
Расход рабочего тела, кг/с	0,75
Степень повышения давления компрессора	1,95
Давление за компрессором, МПа	0,21
Температура за компрессором, К	445,7
Удельная работа компрессора, кДж/кг	31,2
Степень расширения в турбине	1,79
Давление газа перед турбиной, МПа	0,206
Холодный теплоноситель	Воздух
Температура холодного теплоносителя, К:	
на входе	303,15
на выходе	304,73
Давление холодного теплоносителя, МПа	0,101
Расход холодного теплоносителя, кг/с	0,5
Потери давления холодного теплоносителя, %	0,66
Горячий теплоноситель	ПМС-1,5
Температура горячего теплоносителя, К:	
на входе	353,15

на выходе	323,15
Давление горячего теплоносителя, МПа	0,2
Расход горячего теплоносителя, кг/с	0,016
Мощность циркуляционного насоса, Вт	0,024
Скорость теплоносителя, м/с:	
горячего	0,1
холодного	18,5
Длина матрицы, м:	
по холодной стороне	0,1
по горячей стороне	0,43
Высота матрицы, м	0,77
Объем матрицы, м ³	$3,9 \cdot 10^{-3}$

Исходя из полученных данных спроектировано колесо центробежного компрессора (рис. 2) и разработан концевой охладитель (рис. 3) [6]. Данный теплообменный агрегат предназначен для сброса теплоты из контура. По горячей стороне концевой охладителя проходит кремнийорганическая жидкость (полиорганосилоксановых жидкостей 1,5), которая до попадания в теплообменник снимает избыточную теплоту из контура (перед компрессором). По холодной стороне двумя вентиляторами продувается воздух, сбрасывающий избыточную теплоту.

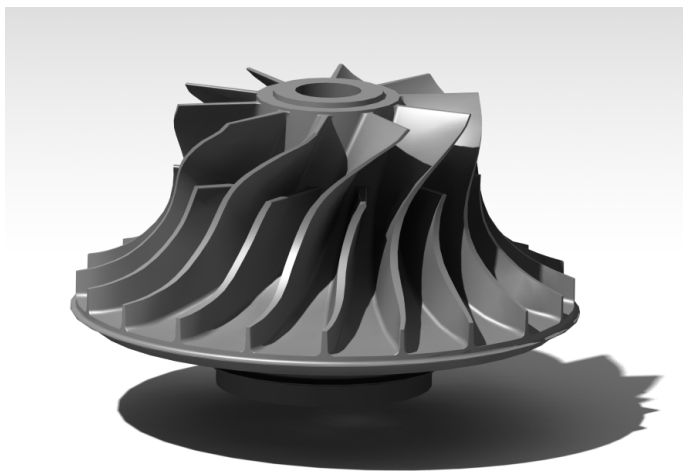


Рис. 2. Рабочее колесо центробежного компрессора

Компоновка стенда. На основе расчетных зависимостей критических узлов замкнутой газотурбинной установки (центробежный компрессор, центростремительная турбина, электронагреватель, концевой холодильник, рекуператор и генератор) определены геометрические размеры элементов конструкции, что позволило создать компоновочную схему двухпетлевой ЗГТУ.

Компоновка стенда проведена в соответствии с требованиями минимизации габаритных размеров конструкции с целью размещения стенда в лаборатории НИИ ЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Мини-

мизация габаритов стенда выполнена с условием снижения гидравлических потерь в контуре, которые оказывают существенное влияние на работоспособность и эффективность ЗГТУ. При разработке стенда учтены особенности вентиляции помещения и ограничения по возможному тепловыделению. Именно поэтому выбран двухкорпусный двухходовой электрический нагреватель с минимальным выделением теплоты в помещение, что необходимо для стабильной работы концевых охладителей и позволяет поддерживать расчетную температуру перед компрессорами.

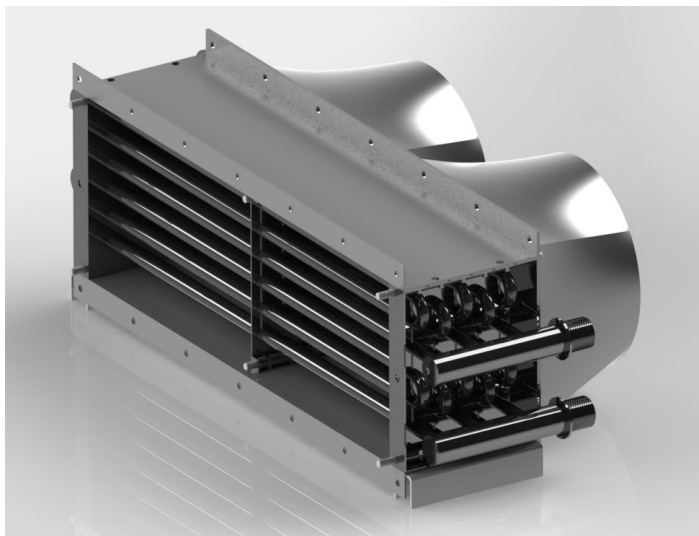


Рис. 3. Концевой охладитель

При проектировании двухпетлевой установки особое внимание уделено симметричности петель и равенству потерь давления в них. В ЗГТУ большое значение имеют также утечки теплоты от горячих частей (рекуператор, нагреватель, турбина, газопроводы между ними), что приводит к необходимости обеспечения наименьшей длины тракта горячего теплоносителя, а следовательно, максимального приближения турбины к электронагревателю и рекуператора к турбине. Исходя из этих соображений, рекуператор был развернут и присоединен к фланцу патрубка, идущего от турбины, благодаря чему удалось минимизировать расстояние между турбиной и рекуператором (рис. 4, 5).

Таким образом, на основании вариантных расчетов и моделирования схемных решений разработан макетный образец двухпетлевой замкнутой газотурбинной установки мощностью 10 кВт, отвечающий требованиям технического задания. Данная модель предназначена для исследования проблем совместной работы двух модулей ЗГТУ с единым газовым контуром и определения оптимальных алгоритмов управления одноконтурными многопетлевыми замкнутыми газотурбинными установками [7], в том числе и космического назначения.

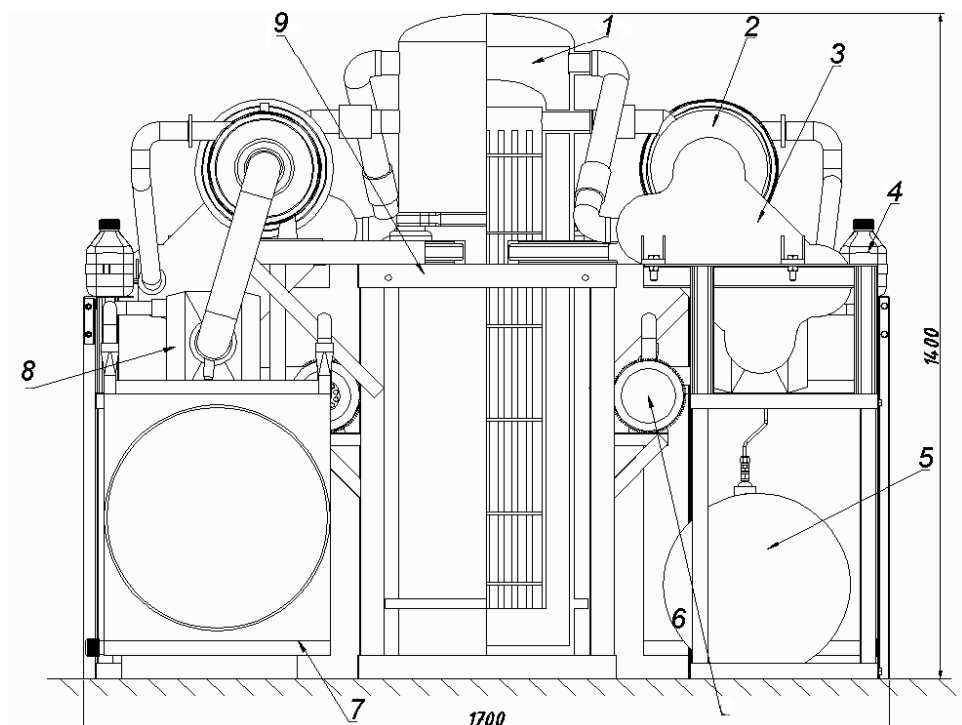


Рис. 4. Компоновка стенда:

1 — электрический газонагреватель; 2 — блок ТГК; 3 — рекуператор; 4 — расширительный бачок; 5 — баллон подкачки газа; 6 — насос системы сброса теплоты из контура; 7 — концевой радиатор; 8 — концевой теплообменный аппарат; 9 — рама

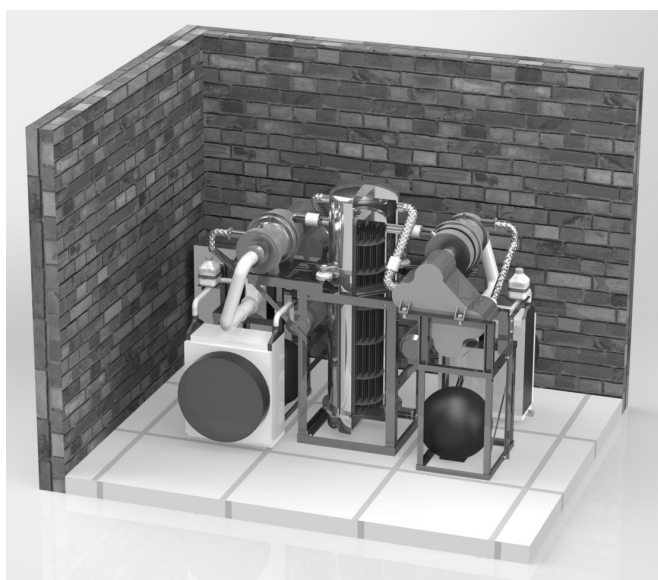


Рис. 5. Окончательный вариант компоновки двухпетлевой ЗГТУ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ (государственный контракт от 25 августа 2011 года № 16.516.11.6112) и ОАО “НИКИЭТ” им. Н.А. Доллежалея.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михальцев В.Е., Моляков В.Д. Расчет цикла газотурбинной установки: учеб. пособие / под ред. И.Г. Суровцева. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 32 с.
2. Бекнев В.С., Куфтов А.Ф., Тумашев Р.З. Методическое указание по расчету и проектированию центробежных компрессоров ГТД. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1996. 41 с.
3. Митрохин В.Т. Выбор параметров и расчет центростремительной турбины. М.: Машиностроение, 1974. 226 с.
4. Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок / В.Л. Иванов, А.И. Леонтьев, Э.А. Манушин, М.И. Осипов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 592 с.
5. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под ред. М. О. Штейнберга. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
6. Kays W.M., London A.L. Compact Heat Exchangers 2nd ed. N. Y.: Hill Book Co., 1967.
7. Ядерные газотурбинные и комбинированные установки: монография / Э.А. Манушин, В.С. Бекнев, М.И. Осипов, И.Г. Суровцев. М.: Энергоатомиздат, 1993. 271 с.

Статья поступила в редакцию 26.09.2012