

## Исследование возможности создания макетного образца двухпетлевой замкнутой газотурбинной энергетической установки мощностью 10 кВт

# 07, июль 2012

DOI: 10.7463/0712.0432244

Арбеков А. Н., Новицкий Б. Б., Колосов Н. Ф.

УДК 621.438

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

[novitskiybronislav@gmail.com](mailto:novitskiybronislav@gmail.com)

### Введение

Разработка энергетической установки большой мощности требует не только понимания физических принципов ее работы и использования математического моделирования процессов, происходящих в ней, но и экспериментальных данных, полученных при испытаниях подобных установок и их критических узлов. При отсутствии экспериментальных данных и полноты информации о процессах, протекающих в узлах установки, создание полномасштабной установки становится весьма дорогостоящим и долговременным занятием, 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 исследовать уменьшенные копии объектов, используя методы анализа размерностей и теорию подобия с учетом автомодельности процессов по

отдельным определяющим критериям. Такие исследования существенно снижают стоимость и сокращают время создания и отработки натуральных объектов. В данной работе выполнено исследование возможности создания макетного образца двухпетлевой замкнутой газотурбинной установки (ЗГТУ) электрической мощностью 10 кВт, позволяющей моделировать многопетлевые ЗГТУ мощностью от десятков до сотен кВт. Разработкой космических замкнутых установок занимается НИИ Энергомашиностроение, где при В.Л. Самсонове был создан макетный образец, представленный в докладе «Блок турбогенератора-компрессора опытных образцов космической и наземной ЗГТЭУ  $N_e = 1 \dots 3$  кВт» С.В. Голубевым и В.Л. Самсоновым на X Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели».

В ходе исследования макетного образца двухпетлевой ЗГТУ был решен ряд задач, что позволило определить основные параметры макетного образца, выполнить оптимизацию критических узлов и на этой базе разработать компоновку, которая учитывает конструктивные особенности этих узлов и условия симметрии.

### **Постановка задачи**

На основе результатов многолетних работ по созданию замкнутых газотурбинных установок и отработке их критических узлов, выполненных в НИИ ЭМ МГТУ имени Н.Э. Баумана под руководством В.Л. Самсонова, было сформулировано техническое задание на создание макетного образца, со следующими основными параметрами:

- мощность – 10 кВт (2 петли),
- температура перед турбиной – 1073 К,
- температура перед компрессором – 320 К,
- рабочее тело – гелий-ксеноновая смесь (83,8 кг/кмоль),
- частота вращения ротора – 24 000-50 000 об/мин,

- давление рабочего тела перед компрессором – 0,11 Мпа,
- степень регенерации – 0,95,
- коэффициент сохранения полного давления в контуре – 0,9.

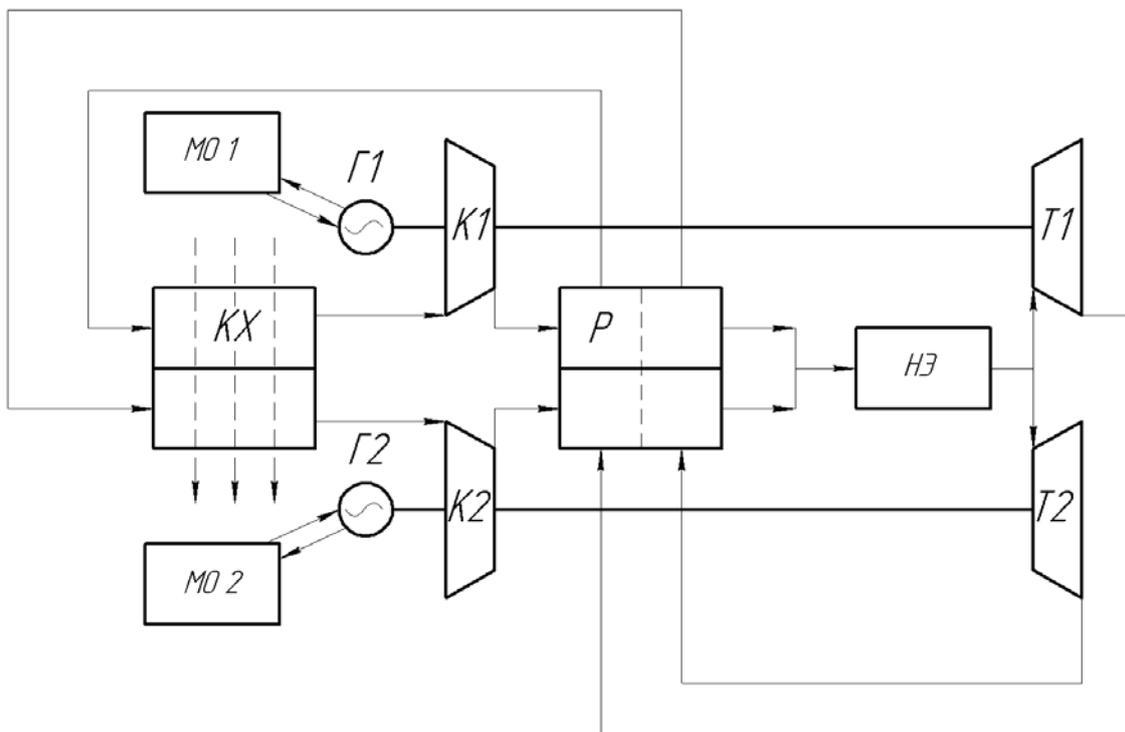
Макетный образец необходимо скомпоновать для возможности размещения стенда в лаборатории НИИ Энергетического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана, для решения следующих задач:

- исследование совместной работы двух газотурбинных преобразователей энергии в едином газовом контуре от общего нагревателя,
- совместная работа модулей ЗГТЭУ на номинальном режиме и отработка работы на режиме собственных нужд,
- исследование процессов пуска и останова модулей, а также выбор оптимального алгоритма управления пуском,
- исследование переходных процессов,
- построение алгоритма управления модулями ЗГТУ в переходных процессах,
- исследование 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 происходит в центробежном компрессоре (К1, К2), на привод которого затрачивается часть работы турбины, а затем рабочее тело подогревается в рекуператоре (Р) и нагревается в электронагревателе (НЭ) до

1073 К. Центростремительная турбина (Т1, Т2) срабатывает теплоперепад, производя работу, затрачиваемую на привод компрессора и полезной нагрузки (генератора), преодоление механических потерь, после чего гелий-ксеноновая смесь, являющаяся рабочим телом охлаждается в рекуператоре, возвращая часть теплоты в цикл, а затем сбрасывает ее остатки в конечном холодильнике (КХ).



К1, К2 – компрессоры; Т1, Т2 – турбины; Р – регенератор, МО 1, МО 2 – масло охладители, НЭ – электронагреватель, КХ – конечной охладитель

Рис. 1 – Схема двухпетлевой замкнутой газотурбинной энергетической установки с общим конечных охладителем

Размещение энергетической установки в двухпетлевом исполнении в лаборатории потребовало изменения параметров при входе (температура перед компрессором была повышена, для улучшения отвода теплоты от конечного охладителя). Это потребовало пересчёта цикла и корректировки оптимальных параметров замкнутой газотурбинной установки.

Оптимизация цикла ЗГТУ выполнена посредством известных зависимостей [1...4] для определения:

- температуры торможения за компрессором

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

где  $k$  – показатель адиабаты;  $\eta_k$  – ожидаемый к.п.д. компрессора.

– температуры торможения за турбиной

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

где  $\eta_T$  – ожидаемый к.п.д. турбины;  $G = \rho V_v S$  – расход рабочего тела;  $\rho$  – плотность;  $V_v$  – объём;  $S$  – площадь поперечного сечения.

Техническое задание ограничивает минимальное значение коэффициента сохранения полного давления в контуре величиной 0,9, а значит, требует уточнения величин гидравлических сопротивлений в трубопроводах, оценка которых была выполнена по методике [5] в соответствии с известной зависимостью

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

где  $L, d$  – длина и диаметр трубопровода длины;  $\rho$  – плотность газовой смеси;  $V$  – скорость;  $\xi_{mp}$  – коэффициент трения.

В результате расчета цикла были определены основные параметры двухпетлевой установки и рассчитан маслоохладитель (рис. 2), предназначенный для сброса теплоты из контура перед компрессором:

- к.п.д. цикла – 0,341;
- расход рабочего тела – 0,75 кг/с;
- степень повышения давления компрессора – 1,95;
- давление за компрессором – 0,21 МПа;
- температура за компрессором – 445,7 К;
- удельная работа компрессора – 31,2 кДж/кг;
- степень расширения в турбине – 1,79;

- давление газа перед турбиной – 0,206 МПа;
- холодный теплоноситель - воздух;
- температура холодного теплоносителя на входе – 303,15 К;
- температура холодного теплоносителя на выходе – 304,73 К;
- давление холодного теплоносителя – 0,101 МПа;
- расход холодного теплоносителя - 0,5 кг/с;
- потери давления холодного теплоносителя - 0,66%;
- горячий теплоноситель – ПМС-1,5;
- температура горячего теплоносителя на входе – 353,15 К;
- температура горячего теплоносителя на выходе – 323,15 К;
- давление горячего теплоносителя – 0,2 МПа;
- расход горячего теплоносителя - 0,016 кг/с;
- мощность циркуляционного насоса – 0,024 Вт;
- скорость горячего теплоносителя – 0,1 м/с;
- скорость холодного теплоносителя – 18,5 м/с;
- длина матрицы по холодной стороне – 0,1 м;
- длина матрицы по горячей стороне – 0,43 м;
- высота матрицы – 0,77 м,
- объем матрицы –  $3,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ .

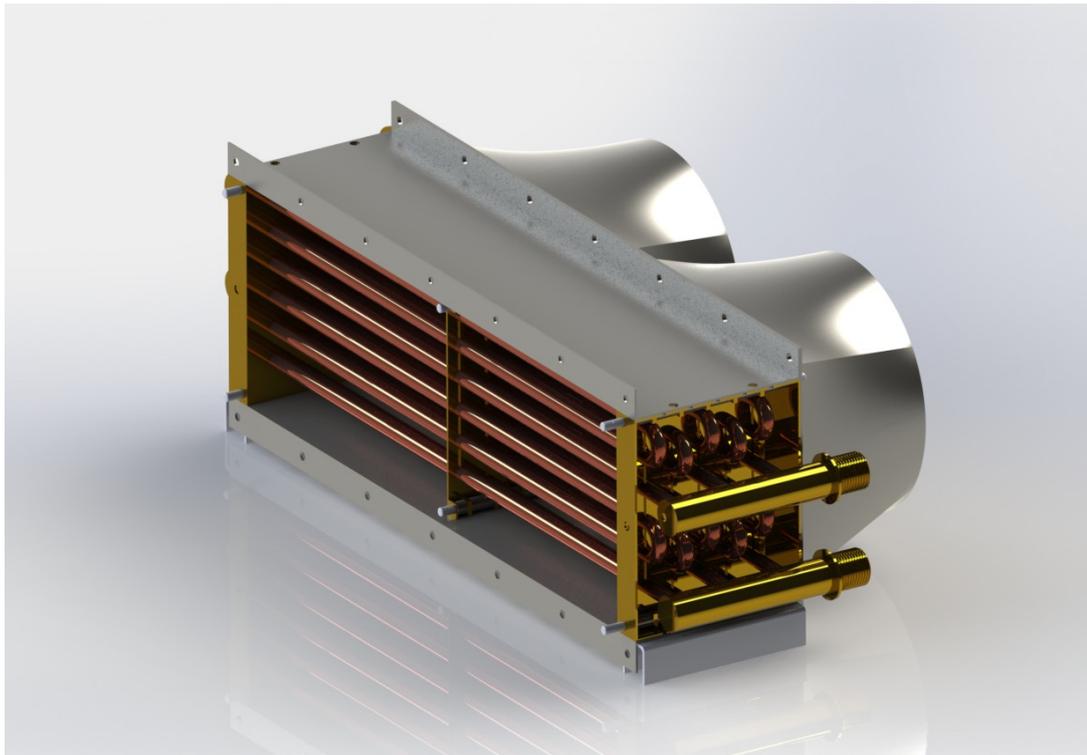


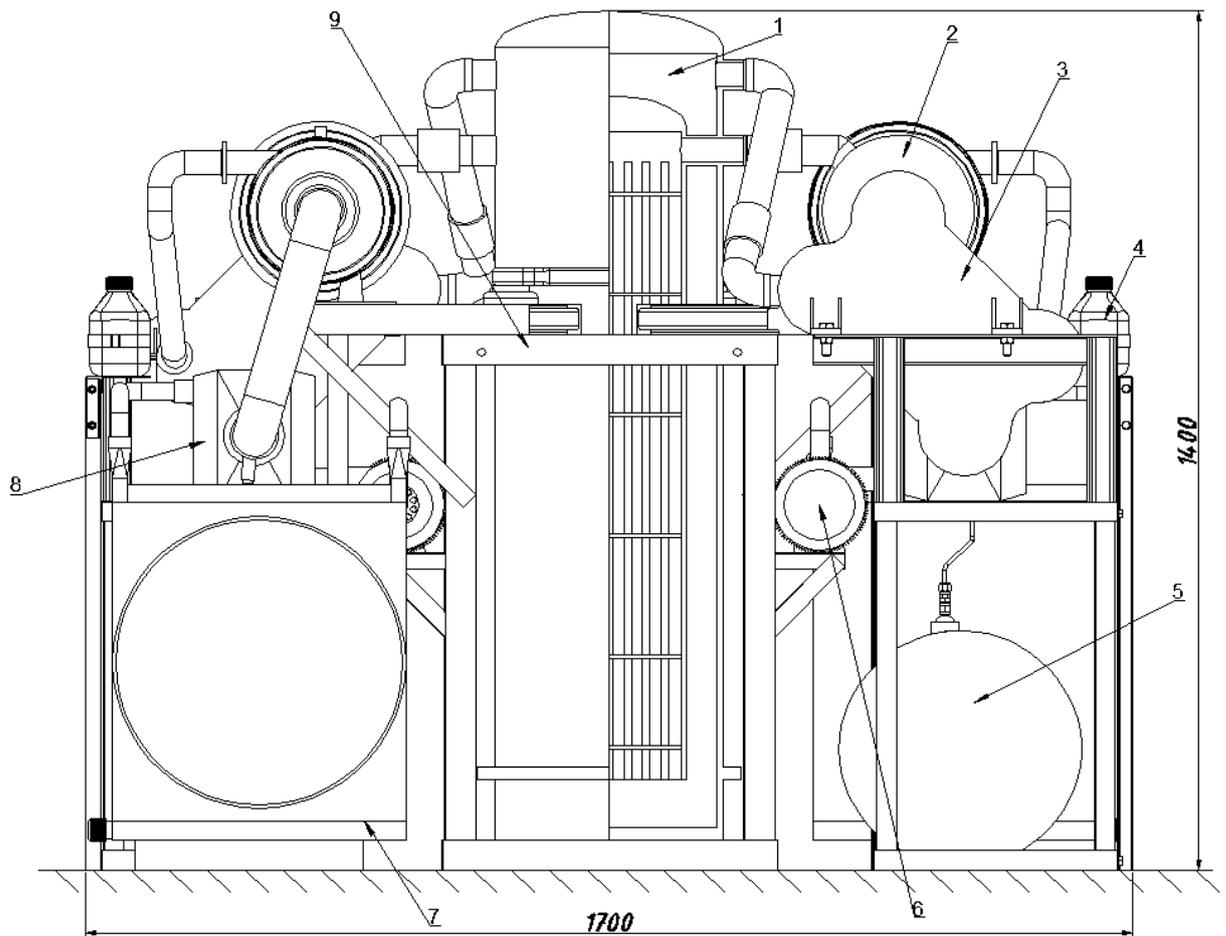
Рис. 2. Маслоохладитель.

### **Компоновка стенда**

На основе полученных данных критических узлов замкнутой газотурбинной установки (центробежный компрессор, центростремительная турбина, электронагреватель, концевой холодильник, рекуператор и генератор) были определены геометрические размеры элементов конструкции, что позволило создать компоновочную схему двухпетлевой ЗГТЭУ.

Компоновка стенда создавалась с требованиями минимизации габаритных размеров конструкции, для возможности размещения стенда в лаборатории НИИ ЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана что потребовало рассмотрения нескольких вариантов компоновки. Минимизация габаритов стенда выполнена при условии снижения гидравлических потерь в контуре, которые оказывают существенное влияние на работоспособность и

эффективность ЗГТУ. При разработке стенда учитывались особенности вентиляции помещения, а также ограничения по возможному тепловыделению. Именно поэтому выбор пал на двухкорпусный двухходовой электрический нагреватель, позволяющий минимизировать тепловое выделение в помещении, что необходимо для стабильной работы концевых охладителей и позволяет поддерживать расчётную температуру перед компрессорами. При проектировании двухпетлевой установки особое внимание уделялось 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 привело к необходимости обеспечения наименьшей длины тракта горячего теплоносителя, а, следовательно, максимального приближения турбины к электронагревателю, а рекуператора к турбине. Исходя из этих соображений, рекуператор был развёрнут, и присоединён к фланцу, патрубка идущего от турбины, что позволило минимизировать расстояние между турбиной и рекуператором (рис. 3, 4)



1 – электрический газонагреватель, 2 – блок ТКК, 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. 3 – Компоновка стенда

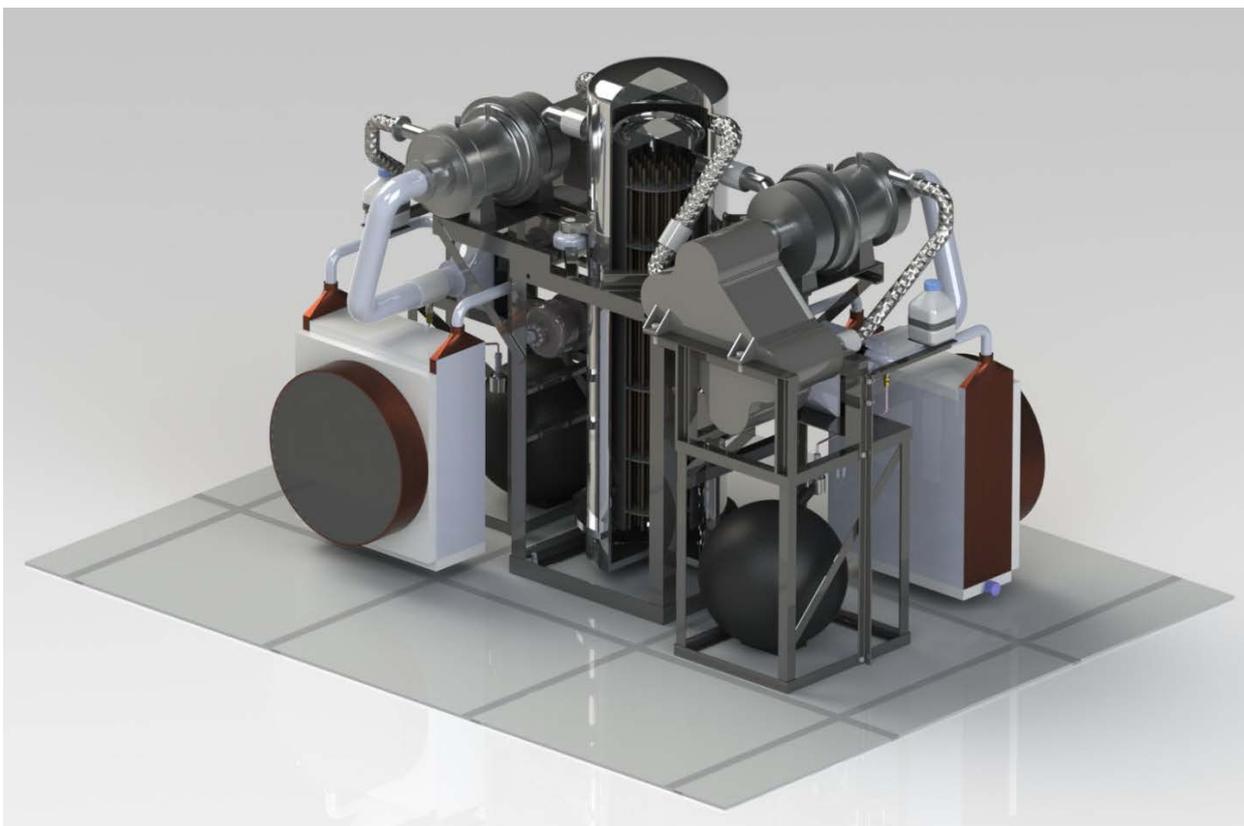


Рис. 4 – Окончательный вариант компоновки двухпетлевой ЗГТУ

### **Заключение**

На основании вариантных расчетов и моделирования компоновочных решений разработана компоновка макетного образца двухпетлевой замкнутой газотурбинной установки мощностью 10 кВт, отвечающего требованиям технического задания. Данный макетный образец предназначен для исследования проблем совместной работы двух модулей ЗГТУ с единым газовым контуром и определения оптимальных алгоритмов управления одноконтурными многопетлевыми замкнутыми газотурбинными установками, в том числе и космического назначения [6].

Работа выполнена при финансовом содействии Министерства науки и образования РФ (государственный контракт от 25 августа 2011 года № 16.516.11.6112).

## Литература

1. Михальцев В.Е., Моляков В.Д. Расчёт цикла газотурбинной установки: Учебное пособие / Под ред. И.Г. Суровцева – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 200 – 32 с.
2. Методическое указание по расчёту и проектированию центробежных компрессоров ГТД. /В.С. Бекнев., А.Ф. Куфтов, Р.З. Тумашев - Москва.: Изд-во МГТУ, 1996. – 41 с.
3. Митрохин В.Т., Выбор параметров и расчет центростремительной турбины. М., «Машиностроение», 1974, 226 с., ил.
4. Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок / Под ред. А.И. Леонтьева – М.: МГТУ им. Баумана, 2004. – 592 с., ил.
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. Ядерные газотурбинные и комбинированные установки: монография / Э.А. Манушин, В.С. Бекнев, М.И. Осипов, И.Г. Суровцев; Под общ. ред. Э.А. Манушина. - М.: Энергоатомиздат, 1993. - 271 с.

---

---

## Study of possibility of creating a 10kW two-loop closed gas turbine power plant

# 07, July 2012

DOI: [10.7463/0712.0432244](https://doi.org/10.7463/0712.0432244)

Arbekov A.N., Novickii B.B., Kolosov N., F.

Russia, Bauman Moscow State Technical University  
[novitskiybronislav@gmail.com](mailto:novitskiybronislav@gmail.com)

This paper presents the results of optimization of a closed Brayton cycle gas turbine power plant with capacity of 10 kW with an electric heater as a heat source. The authors present the results of calculations of assemblies and units included in the model sample of the closed two-loop gas turbine power plant. Analysis of design and arrangement solution required for optimal location of the model sample in the limited dimensions of the room was carried out. Various configuration solutions are also included in the article.

---

**Publications with keywords:** [closed gas multiloop turbine power plant](#), [model sample](#)

**Publications with words:** [closed gas multiloop turbine power plant](#), [model sample](#)

---

### References

1. Mikhail'tsev V.E., Moliakov V.D. *Raschet tsikla gazoturbinoi ustanovki* [Calculation of the cycle of a gas turbine unit]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2000. 32 p.
2. Beknev V.S., Kuftov A.F., Tumashev R.Z. *Metodicheskoe ukazanie po raschetu i proektirovaniu tsentrobezhnykh kompressorov GTD* [Methodical instructions on calculation and design of GTE centrifugal compressors]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1996. 41 p.
3. Mitrokhin V.T. *Vybor parametrov i raschet tsentrostremitel'noi turbiny* [The choice of parameters and calculation of a centripetal turbine]. Moscow, Mashinostroenie, 1974. 226 p.
4. Ivanov V.L., Leont'ev A.I., Manushin E.L., Osipov M.I. *Teploobmennye apparaty i sistemy okhlazhdeniia gazoturbinykh i kombinirovannykh ustanovok* [Heat exchangers and cooling systems of gas turbine and combined installations]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2004. 592 p.
5. Idel'chik I.E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniiam* [Handbook of hydraulic resistance]. Moscow, Mashinostroenie, 1992. 672 p.
6. Manushin E.A., Beknev V.S., Osipov M.I., Surovtsev I.G. *Iadernye gazoturbinye i kombinirovannye ustanovki* [Nuclear gas turbine and combined installations]. Moscow, Energoatomizdat, 1993. 271 p.