

ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ «ШАГ В БУДУЩЕЕ»
НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ СОРЕВНОВАНИЕ «ШАГ В БУДУЩЕЕ,
МОСКВА»

ШМ4036

регистрационный номер

Энергомашиностроение

название факультета

ЭЗ

название кафедры

Солнечная замкнутая газотурбинная установка

электрической мощностью 15 кВт

название работы

Автор:

Зуб Никита Сергеевич

фамилия, имя, отчество

Лицей 1501 СП №204, 10класс

наименование учебного заведения, класс

Научный руководитель:

Арбеков Александр Николаевич

фамилия, имя, отчество

МГТУ им. Баумана

место работы

Доцент

звание, должность

подпись научного руководителя

Содержание:

- 1. Условные обозначения**
- 2. Введение**
- 3. Постановка проблемы**
- 4. Расчет установки**
- 5. Расчет аккумулятора и концентратора**
 - а. Расчет аккумулятора**
 - б. Расчет концентратора**
- 6. Заключение**

Условные обозначения:

L_t – работа турбины [Дж/кг];

L_k – работа компрессора [Дж/кг];

L_y – работа установки [Дж/кг];

π_k – степень сжатия газа в компрессоре;

π_t – степень расширения газа в турбине;

σ – коэффициент сохранения полного давления;

k – показатель адиабаты;

C_p – теплоёмкость аргона при постоянном давлении [Дж/(кг*К)];

Q_1 – энергия, отданная нагревателем [Дж/кг];

Q_2 – энергия, отданная холодильнику [Дж/кг];

$Q_{\text{рег}}$ – энергия, переданная в регенераторе [Дж/кг];

T_1 – температура начальная, перед компрессором [К];

T_2 – температура за компрессором, перед регенератором [К];

T_3 – температура перед турбиной, за нагревателем [К];

T_4 – температура за турбиной, перед конечным холодильником [К];

T_a – температура перед холодильником, после регенератора [К];

T_b – температура перед нагревателем, после регенератора [К];

$\sigma_{\text{рег}}$ – коэффициент регенерации;

G – расход [кг/с];

$N_{\text{эл}}$ – электрическая мощность [Вт];

$\eta_{\text{мех}}$ – КПД механический;

$\eta_{\text{ген}}$ – КПД генератор;

$\eta_{\text{кл}}$ – КПД на клеммах;

M – масса фторида лития [кг];

Q – энергия необходимая для работы установки зимней ночью [Дж];

$\eta_{\text{ак}}$ – КПД аккумулятора;

λ – теплота плавления фторида лития [Дж/кг];

t – длительность зимней ночи[с];

ρ – плотность фторида лития [кг/м³];

V – объём аккумулятора [м³];

π – число пи;

d – диаметр [м];

h – высота цилиндра [м];

S – площадь концентратора [м²];

$\eta_{\text{кон}}$ – КПД концентратора;

W - количество солнечной радиации, падающей на 1 метр квадратный [Вт/м²];

y – координата по оси ординат [м];

x – координата по оси абсцисс [м];

p – коэффициент, равный 2 фокусным расстояниям;

f – фокусное расстояние [м];

a – угловой коэффициент;

b – коэффициент;

$d_{\text{к}}$ – диаметр концентратора [м];

r – радиус отверстия в аккумуляторе [м];

$V_{\text{о}}$ – объём отверстия [м³];

$V_{\text{н}}$ – объём аккумулятора с отверстием [м³];

Введение:

«История развития газовых турбин в России начинается именем П. Д. Кузьминского. В период с 1896 по 1900г. он разработал, построил и испытал в Санкт-Петербурге первый газотурбинный двигатель, в котором процесс сгорания протекал при постоянном давлении», как указано в работе Манушина Э.А., Михальцева В.Е. и Чернобровкина А.П. «Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок» [5]

Как уже было сказано ранее, идеи создания турбомашин возникли давно (например, лопаточные машины для перемещения и сжатия газов появились в середине XIX в.), однако их практическое использование в виде отдельных агрегатов или в составе установок стало возможным только после комплексного решения ряда серьезных научных и технических проблем (газодинамических, тепловых, прочностных, технологических и экономических) [4].

Трудности совершенствования турбомашин связаны с постоянным ростом параметров (температуры и давления рабочего тела) при одновременном повышении окружных скоростей рабочих колес и скоростей движения самого рабочего тела.

Конструирование турбомашин осуществляется в соответствии с назначением газотурбинных и комбинированных установок, на основе анализа современного состояния и перспектив развития установки данного типа. При создании нового образца стационарной или транспортной газотурбинной и комбинированной установки к проектируемой турбомашине, как правило, предъявляют более высокие требования по сравнению с предшествующими моделями по экономичности, удельной и абсолютной мощности, а также маневренности[4].

В настоящее время все более увеличивается применение газотурбинных установок (ГТУ) в различных отраслях промышленности. Газотурбинные

установки широко используются в газотранспортной отрасли и малой энергетике и представляют собой сложный механизм, состоящий из ряда систем, обеспечивающих его экономичную и надежную работу.

Современные представления о превращении теплоты в работу в двигателях внутреннего сгорания заключаются в невозможности создания двигателя, который без подвода дополнительной энергии производил бы механическую работу, а также, в котором подводимая теплота полностью превращалась в работу, то есть в невозможности создания двигателя с КПД, равным сто процентам. Соответственно этим представлениям, газотурбинный двигатель должен состоять из компрессора, нагревателя, турбины и холодильника, что дает возможность непрерывного осуществления процессов сжатия, подвода теплоты и расширения. На рисунке 2 представлена схема простой ГТУ.

Газотурбинный двигатель представляет собой машину, предназначенную для преобразования тепловой энергии в механическую [2].

В зависимости от используемого рабочего тела различают ГТУ открытого (атмосферный воздух) и закрытого цикла. По способу подвода и отвода теплоты в цикле можно выделить установки простого цикла, регенеративного с промежуточным подогревом ил промежуточным охлаждением. В данной работе внимание сфокусировано на замкнутой газотурбинной установке (ЗГТУ), в которой возможен выбор рабочего тела в зависимости от назначения, схемы и уровня мощности [1].

ЗГТУ состоит из следующих частей: электрический генератор, турбокомпрессорная группа, приводящий во вращение электрический генератор, концевой холодильник, газонагреватель, может быть дополнен теплообменником-утилизатором(рис.1).

Регенератор рекуперативного типа – это теплообменный аппарат, который предназначен для передачи теплоты отработавших газов в турбине рабочему телу.

Камера сгорания предназначена для сжигания основного или промежуточного топлива и обеспечения подвода теплоты в цикл.

Системы контроля позволяют автоматически регулировать параметры ГТУ (температура газов, давление, частота вращения ротора, выходная мощность и т.д.).

Компрессор – узел газотурбинного двигателя, повышающий давление рабочего тела.

Нагреватель – устройство подогрева рабочего тела, которое в него поступает, без смешивания его с продуктами сгорания топлива, если речь идёт о ЗГТУ.

Генератор – машина, преобразующая механическую энергию вращения ротора в электрическую.

Турбина – узел газотурбинного двигателя, преобразующий потенциальную энергию нагретого рабочего тела в механическую работу, сообщая работу компрессору и генератору

На рисунке 3 представлена схема замкнутой газотурбинной установки с регенератором. В регенераторе теплота уходящего из турбины газа передаётся рабочему телу, идущему из компрессора в нагреватель, тем самым нагревая его. Это позволяет уменьшить количество требуемой теплоты, которую нужно подвести в нагревателе, а также уменьшает количество теплоты, которую нужно отвести в конечном холодильнике.

Газ, отработавший в турбине, не удаляется в атмосферу, как в ГТУ открытого типа, а направляется в конечной холодильник, где охлаждается до начальной температуры. Конечной холодильник является теплообменником

рекуперативного типа, где охлаждающей средой часто является вода. Далее охлажденный газ поступает в компрессор, где сжимается, вследствие чего происходит повышение его температуры. Затем газ направляется в регенератор, в котором происходит его подогрев. Вместо камеры сгорания в ЗГТУ устанавливают нагреватель, в котором рабочее тело пропускается внутри трубок. Снаружи трубки нагреваются теплом, которое передается посредством концентратора в течение дня от солнечного света. В результате в нагревателе резко возрастает температура рабочего тела, после чего газ поступает в турбину, где совершается работа и температура падает. Турбина при этом вращает компрессор и генератор. Отработавший газ направляется в регенератор и цикл повторяется [3] (рис. 11).

Цикл солнечной ЗГТУ (рис. 4,5,8) состоит из процессов изоэнтропного сжатия и расширения, изобарного подвода и отвода теплоты. Сжатие рабочего тела происходит в центробежном компрессоре (К), на привод которого затрачивается часть работы турбины, а затем рабочее тело подогревается в рекуператоре (регенераторе) (Р) и нагревается в нагревателе (Н) до 1073 К. Центростремительная турбина (Т) срабатывает теплоперепад, производя работу, затрачиваемую на привод компрессора и полезной нагрузки (генератора), преодоление механических потерь, после чего аргон, являющаяся рабочим телом охлаждается в рекуператоре, возвращая часть теплоты в цикл, а затем сбрасывает ее остатки в конечном холодильнике (КХ) [2].

Постановка проблемы: разработка схемы и рациональных параметров замкнутой газотурбинной установки электрической мощностью 15 кВт.

Сформулировано техническое задание по оценке параметров и облика солнечной ЗГТУ для наземного потребителя, со следующими основными параметрами:

- ✓ Электрическая мощность – 15 кВт (1 петля)
- ✓ Работа установки – 47000Дж

Были приняты значения следующих параметров:

- ✓ Температура перед компрессором – 67°C (340K)
- ✓ Температура перед турбиной – 800°C (1073K)
- ✓ Рабочее тело – Аргон (40 г/моль)
- ✓ КПД компрессора - 0,84
- ✓ КПД турбины - 0,9
- ✓ КПД аккумулятора – 0,9
- ✓ КПД генератора – 0,92
- ✓ КПД концентратора – 0,95
- ✓ КПД механическое – 0,98
- ✓ Коэффициент регенерации – 0,93

Были взяты значения следующих параметров:

- ✓ Количество солнечной радиации, падающей на метр квадратный - 720 Вт/м²
- ✓ Температура плавления фторида лития – 1121K
- ✓ Теплота плавления фторида лития - 1,044*10⁶Дж/кг
- ✓ Теплоёмкость аргона при постоянном давлении - 518 Дж/(кг*К)
- ✓ Показатель адиабаты – 1,667

Расчет установки:

Найдем работу турбины по формуле:

$$L_T = C_p * T_3 * \left(1 - \pi_T^{\frac{1-k}{k}}\right) * \eta_T,$$

Теперь найдем работу компрессора по формуле:

$$L_K = C_p * T_1 * \left(\pi_K^{\frac{k-1}{k}} - 1\right) * \frac{1}{\eta_K},$$

Отсюда найдем работу всей установки:

$$L_y = L_T - L_K = C_p \left(T_3 \left(1 - (\sigma * \pi_K)^{\frac{1-k}{k}}\right) * \eta_T - T_1 \left(\pi_K^{\frac{k-1}{k}} - 1\right) * \frac{1}{\eta_K} \right) =$$

$$518 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} * \text{К}} \right] * \left(1073[\text{К}] * \left(1 - (0,92 * 2,3)^{-\frac{0,667}{1,667}}\right) * 0,9 - 340[\text{К}] \left(2,3^{\frac{0,667}{1,667}} - 1\right) * \frac{1}{0,84} \right) = 49000 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right],$$

Найдем расход рабочего тела (аргона) по формуле:

$$G = \frac{N_{\text{эл}}}{L_y \eta_{\text{мех}} \eta_{\text{ген}}} = \frac{15000[\text{Вт}]}{0,98 * 0,92 * 49000 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right]} = 0,34 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Найдем T_4 через формулу:

$$T_4 = T_3 - \frac{L_T}{C_p},$$

Теперь найдем T_2 через формулу:

$$T_2 = T_1 + \frac{L_K}{C_p} = 340[\text{К}] + \frac{41388 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right]}{518 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} * \text{К}} \right]} = 806\text{К},$$

Теперь найдем теплоту получаемую от нагревателя:

$$Q_1 = C_p * G(T_3 - T_2) = 518 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} * \text{К}} \right] * 0,34 \left[\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right] (1073[\text{К}] - 806[\text{К}]) = 47000 \text{Вт},$$

Рассмотрим установку с регенератором и найдем количество теплоты передаваемое в нем от газа из турбины газу, идущему в нагреватель:

$$Q_{\text{рег}} = C_p * G * (T_a - T_2) = 81000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}},$$

Отсюда найдем КПД простой установки:

$$\begin{aligned} \eta_y = \frac{L_y}{Q_1} &= \frac{C_p [T_3 \left(1 - (\sigma * \pi_K)^{\frac{1-k}{k}} \right) * \eta_T - T_1 (\pi_K^{\frac{k-1}{k}} - 1) * \frac{1}{\eta_K}]}{Q_1} \\ &= \frac{518 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} * \text{К}} \right] * (1073[\text{К}] * \left(1 - (0,92 * 2,3)^{-\frac{0,667}{1,667}} \right) * 0,9)}{217000 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right]} \\ &\quad - \frac{518 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} * \text{К}} \right] * 340[\text{К}] (2,3^{\frac{0,667}{1,667}} - 1) * \frac{1}{0,84}}{217000 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right]} \approx 0,2 \end{aligned}$$

и установки с регенератором рекуперативного типа:

$$\begin{aligned} \eta_y = \frac{L_y}{Q_1 - Q_{\text{рег}}} &= \frac{C_p [T_3 \left(1 - (\sigma * \pi_K)^{\frac{1-k}{k}} \right) * \eta_T - T_1 (\pi_K^{\frac{k-1}{k}} - 1) * \frac{1}{\eta_K}]}{Q_1 - Q_{\text{рег}}} \\ &= \frac{518 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} * \text{К}} \right] * (1073[\text{К}] * \left(1 - (0,92 * 2,1)^{-\frac{0,667}{1,667}} \right) * 0,9)}{217000 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right] - 81000 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right]} \\ &\quad - \frac{518 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} * \text{К}} \right] * (340[\text{К}] * \frac{\left(1 - (0,92 * 2,1)^{\frac{0,667}{1,667}} \right)}{0,84})}{217000 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right] - 81000 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right]} \approx 0,32 \end{aligned}$$

Следовательно, максимальный КПД у установки с регенератором рекуперативного типа больше максимального КПД у простой установки, поэтому отдадим предпочтение установке регенеративного типа (рис. 9).

Теперь посчитаем КПД на клеммах генератора, учитывая механические потери (рис.10), по формуле:

$$\eta_{\text{кл}} = \eta_{\text{мех}} * \eta_{\text{ген}} * \eta_{\gamma} = 0,98 * 0,92 * 0,32 = 0,29,$$

Расчет аккумулятора и концентратора:

Расчет аккумулятора:

Примем в качестве рабочего тела фторид лития.

Найдем его массу по формуле:

$$M = \frac{Q}{\lambda * \eta_{\text{ак}}} = \frac{t * N}{\lambda * \eta_{\text{ак}} * \eta_{\gamma}} = \frac{3600 \text{с} * 15000 \text{Вт}}{1044000 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right] * 0,9 * 0,3} = 3263 \text{кг},$$

Теперь вычислим объём аккумулятора:

$$V = \frac{M}{\rho} = \frac{t * N}{\rho * \lambda * \eta_{\text{ак}} * \eta_{\gamma}} = 1,24 \text{м}^3,$$

Так как аккумулятор цилиндрической формы, можно посчитать его объём по формуле::

$$V = \frac{\pi d^2 * h}{4},$$

Примем диаметр равный высоте, тогда

$$V = \frac{\pi d^3}{4},$$

Отсюда найдем диаметр:

$$d = \sqrt[3]{\frac{V * 4}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{M}{\rho}} = \sqrt[3]{\frac{4 * t * N}{\pi * \rho * \lambda * \eta_{ак} * \eta_{у}}} = 1,16 \text{ м},$$

Расчет концентратора:

Найдём площадь концентратора по формуле:

$$S = \frac{Q}{\eta_{кон} * W} = 67,31 \text{ м}^2,$$

Отсюда найдем его диаметр:

$$d_k = \sqrt{\frac{S * 4}{\pi}} = 9,26 \text{ м}$$

Найдем фокусное расстояние концентратора, приняв, что он является параболоидом:

$$y^2 = 2px,$$

Так как $p=2f$, получаем:

$$y^2 = 4fx,$$

Проведем прямую через крайнюю точку концентратора и фокус, получим следующую функцию:

$$y = ax+b \quad (1)$$

Отсюда получим следующее уравнение:

$$4fx=(ax+b)^2,$$

Примем $y=\frac{d}{2}$, получим:

$$4fx=\frac{d_k^2}{4} \quad (2)$$

Рассмотрим уравнение(1), при $y=0$,

$$ax+b=0,$$

Следовательно:

$$x = -\frac{b}{a} = f,$$

Следовательно:

$$4fx=a^2(x - f)^2,$$

Вернемся к уравнению (2) и (1):

$$\frac{d_k^2}{4} = a^2(x - f)^2$$

Отсюда:

$$\frac{d_k}{2} = a(x - f)$$

Примем угол между лучом, отраженным от края концентратора, и прямой, проходящей через фокус и центр концентратора, равным 30 градусов, тогда

$$a = \frac{\sqrt{3}}{3},$$

Следовательно:

$$f = d * \frac{\sqrt{3}}{2} - x,$$

Отсюда получим квадратное уравнение:

$$16 * x^2 + 8x d_k \sqrt{3} - d_k^2 = 0$$

В итоге получаем прямоугольный треугольник со сторонами: 4,99м; 9,98м; 8,64м; и углами: 30°, 60°, 90°(рис.6).

Определим радиус отверстия в аккумуляторе из треугольника со стороной 9,98м и углами: 32' и 120°(рис. 7).

Отсюда найдём радиус отверстия:

$$r = 0,05\text{м},$$

Проведем расчет объёма аккумулятора с учетом наличия отверстия :

$$V_H = V + V_0 = \pi \frac{(d)^3 + (d) * 4r^2}{4},$$

Отсюда получим новый диаметр, равный высоте цилиндра, и равный:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 * V_H}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 * (V + V_0)}{\pi}} = \sqrt[3]{d^3 + d * 4 * r^2} = 1,19\text{м},$$

В результате расчета были определены основные параметры солнечной ЗГТУ:

Величина	Значение	Размерность
Рабочее тело	Аргон	-
Молярная масса аргона	40	кг/ кмоль
Ср, теплоемкость при постоянном давлении аргона	518	Дж/(кг*К)
η (КПД) турбины	0,9	-
η (КПД) компрессора	0,84	-
η (КПД) установки	0,32	-
η (КПД) механическое	0,98	-
η (КПД) на клеммах	0,29	-
η (КПД) генератора	0,92	-
N, мощность	15	кВт
T ₁ , температура перед компрессором	340	К
T ₂ , температура после компрессора	411	К
T ₃ , температура перед турбиной	1073	К
T ₄ , температура после турбины	749	К
T _а , температура перед нагревателем, после регенератора	725	К
Q ₁ , теплота нагревателя	217000	Дж/кг
Q _{рег} , теплота регенератора	81000	Дж/кг
G, расход	0,34	кг/с
t, длительность зимней ночи	64800	с
T, температур плавления фторида лития	1121	К
Коэффициент регенерации	0,93	-
Показатель адиабаты	1,667	-
W, солнечная радиация	720	Вт/м ²
η (КПД) аккумулятора	0,9	-
η (КПД) концентратора	0,95	-

S, площадь концентратора	67,31	м ³
d, Диаметр концентратора	9,26	м
f, Фокусное расстояние	8,64	м
x, Глубина концентратора	0,62	м
λ , теплота плавления фторида лития	$1,044 \cdot 10^6$	Дж/кг
M, масса соли	3263,35	кг
ρ , плотность фторида лития	2640	кг/м ³
V, объём аккумулятора	1,33	м ³
d=h, диаметр и высота аккумулятора	1,19	м
d, диаметр отверстия в аккумуляторе	0,1	м

Заключение:

На основании вариантных расчетов и моделирования компоновочных решений разработаны схемы и рациональные параметры замкнутой газотурбинной установки электрической мощностью 15 кВт, отвечающей требованиям технического задания.

В результате проведенной работы были сделаны следующие выводы:

1. Для солнечной ЗГТУ следует отдавать предпочтение регенеративной схеме.
2. В качестве исходных данных будут приняты параметры ЗГТУ, соответствующие максимальному КПД.
3. Получены оптимальные параметры для ЗГТУ, соответствующие максимальному КПД.

Список литературы

1. Арбеков А.Н. Автономная долгоресурсная малообслуживаемая замкнутая газотурбинная установка, работающая на органическом топливе. Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2012. № 3-2 (34). С. 307-312.
2. Рудаченко А.В., Чухарева Н.В., Байкин С.С. Газотурбинные установки. Учебное пособие. – 2008. – 139С.
3. 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.
4. Елисеев Ю.С., Манушин Э.А., Михальцев В.Е., Суровцев И.Г., Осипов М.И. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок. Учебник для вузов / Москва, 2000. (2 издание).
5. Манушин Э.А., Михальцев В.Е., Чернобровкин А.П. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок. М.: Машиностроение, 1977. 447 с.
6. Путилов К. А., Курс физики первый том: учебное пособие / Ленинград, 1952. (издание пятое). 792с.

Приложение:

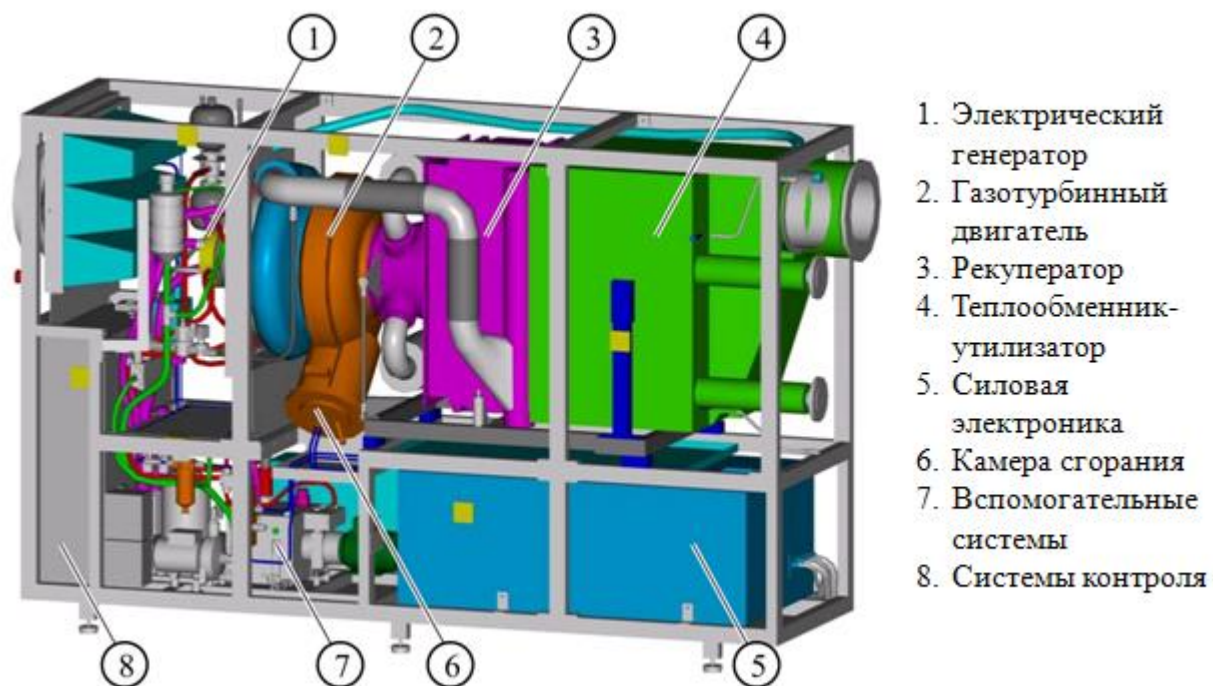
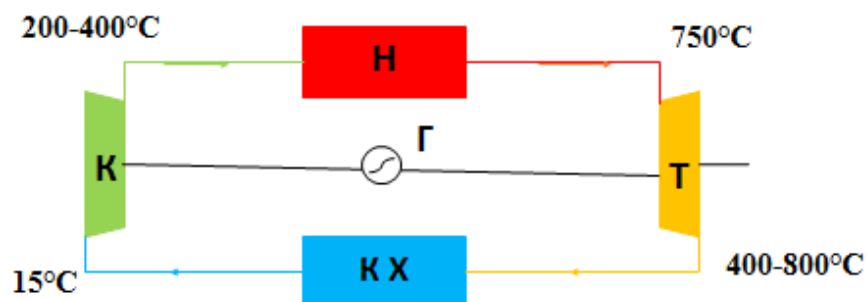
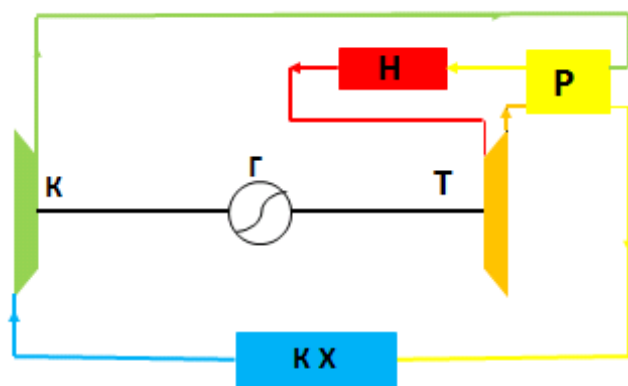


Рисунок 1. Газотурбинная установка



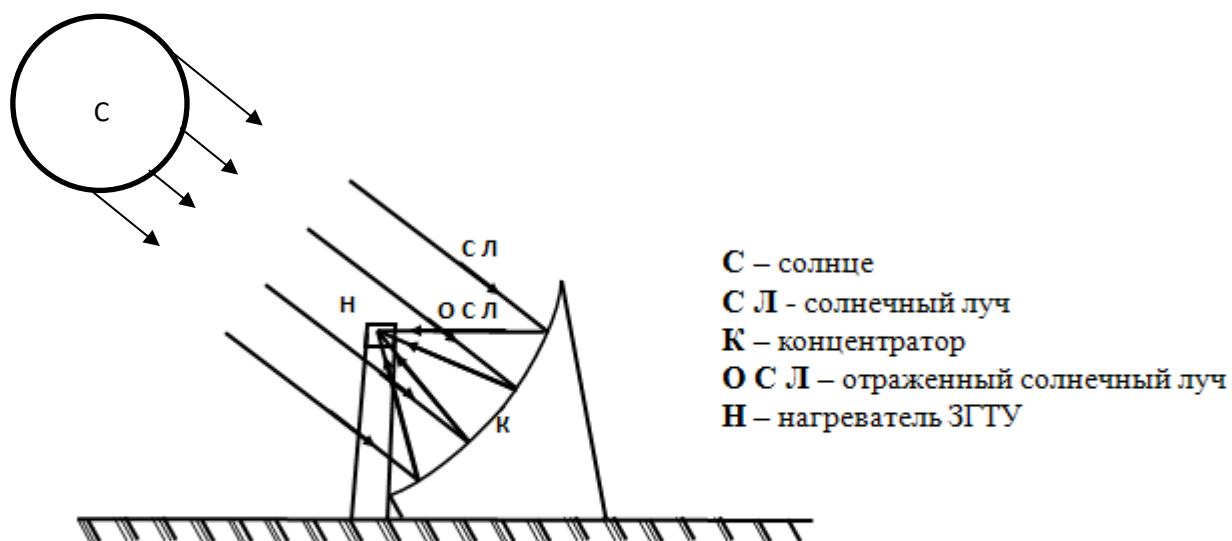
К- компрессор
Н – нагреватель
Г - генератор
Т – турбина
КХ – концевой холодильник

Рисунок 2. Схема простой замкнутой газотурбинной установки



К - компрессор
Р – регенератор
Н – нагреватель
Т – турбина
Г - генератор
КХ – концевой холодильник

Рис. 3 Схема замкнутой газотурбинной установки с регенератором



С – солнце
С Л - солнечный луч
К – концентратор
О С Л – отраженный солнечный луч
Н – нагреватель ЗГТУ

Рисунок 4. Компонировка солнечной ЗГТУ

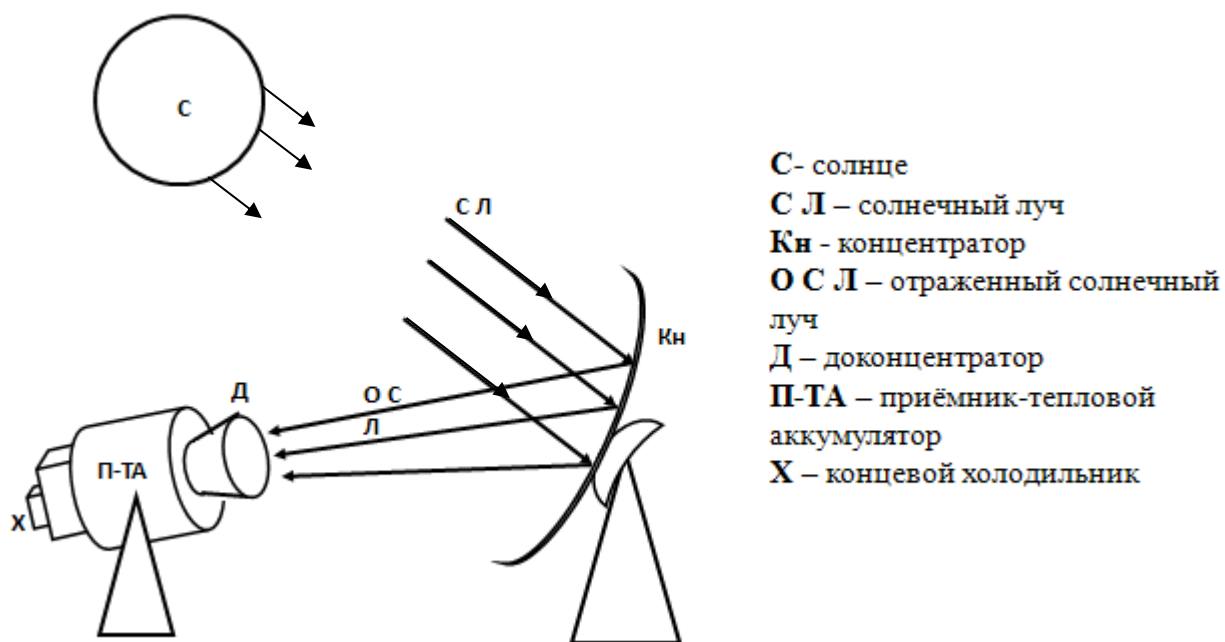


Рисунок 5. Солнечная ЗГТУ

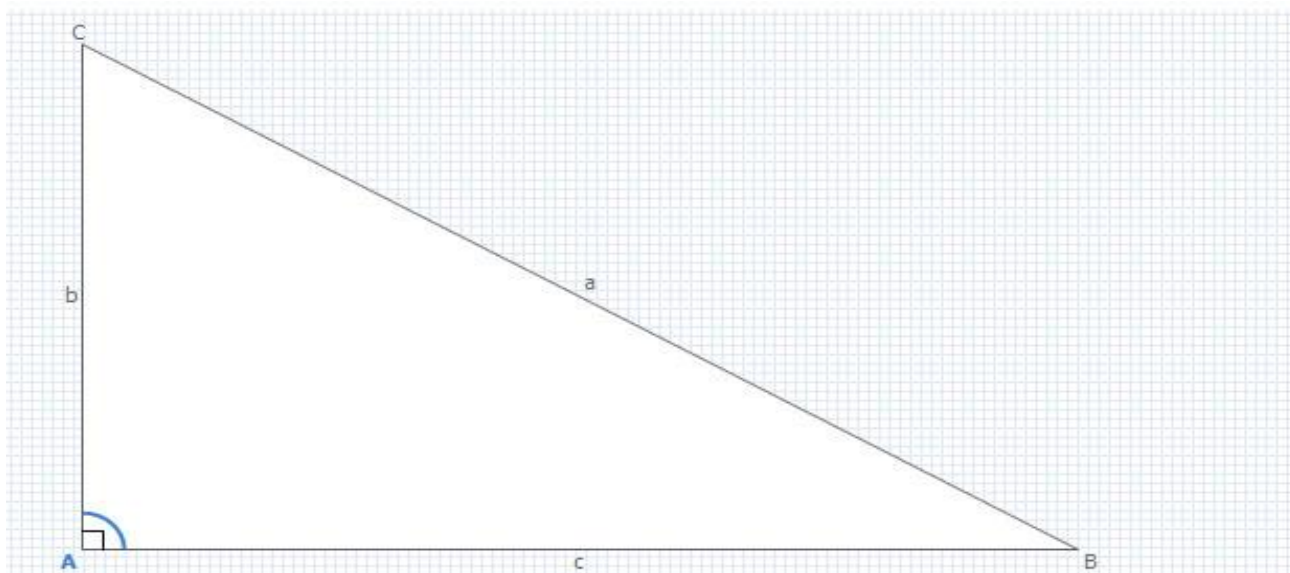


Рисунок 6.

$$b=d/2(\text{половина диаметра}); c=f(\text{фокус});$$



Рисунок 7.

$a=r_{\text{отверстия}}$; b - сторона «а» в треугольнике на рисунке 6.

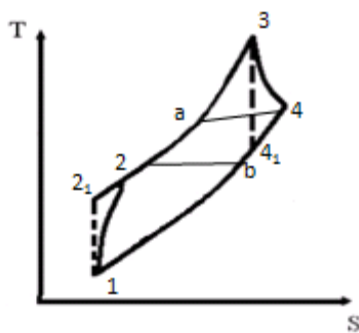


Рисунок 8. Цикл регенеративной газотурбинной установки

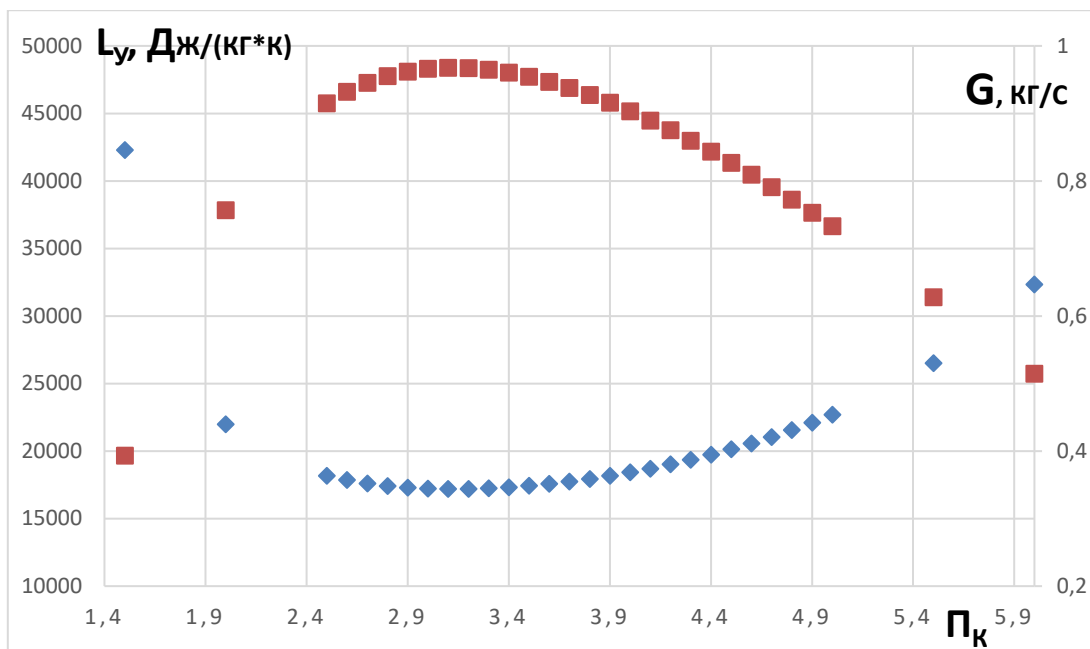


Рисунок 9. Зависимость L_y от π_k и G от π_k

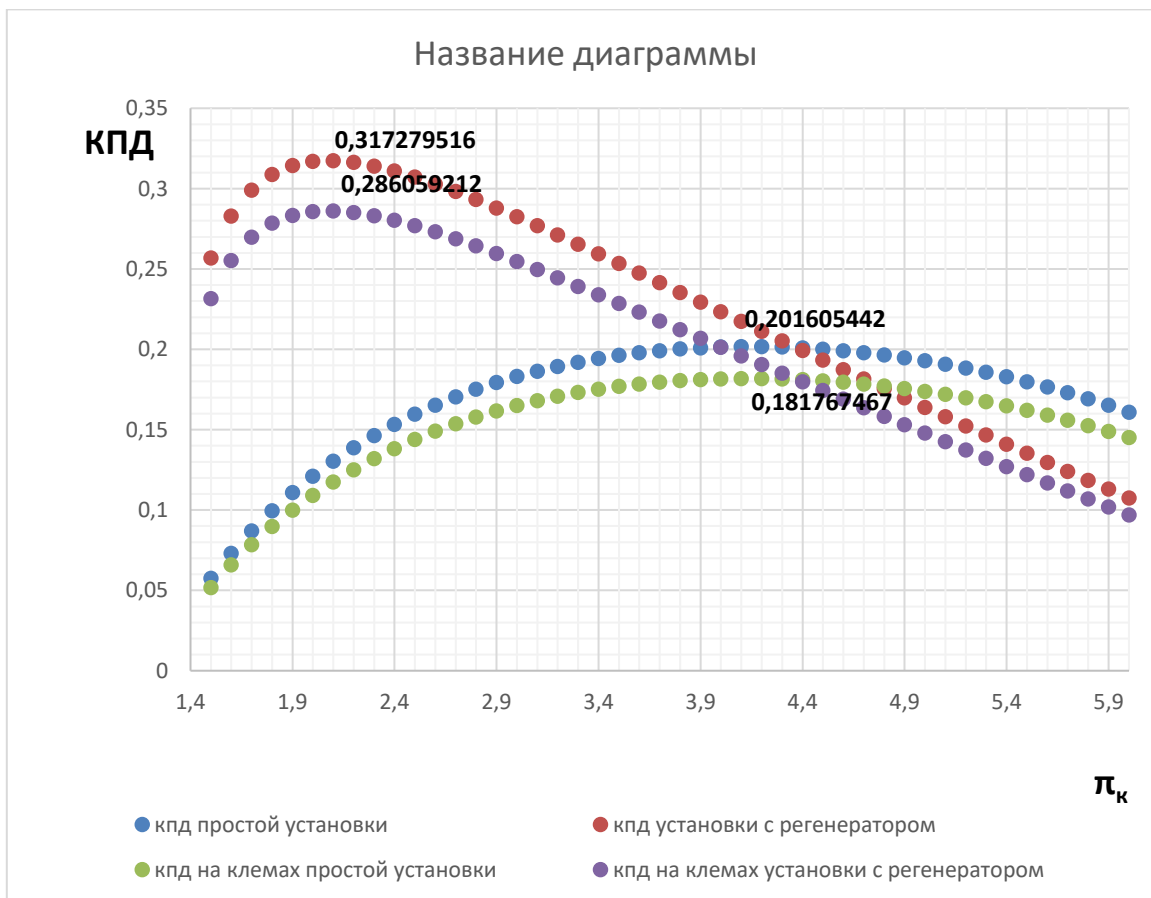


Рисунок 10. Зависимость η от τ_k и $\eta_{кл}$ от τ_k

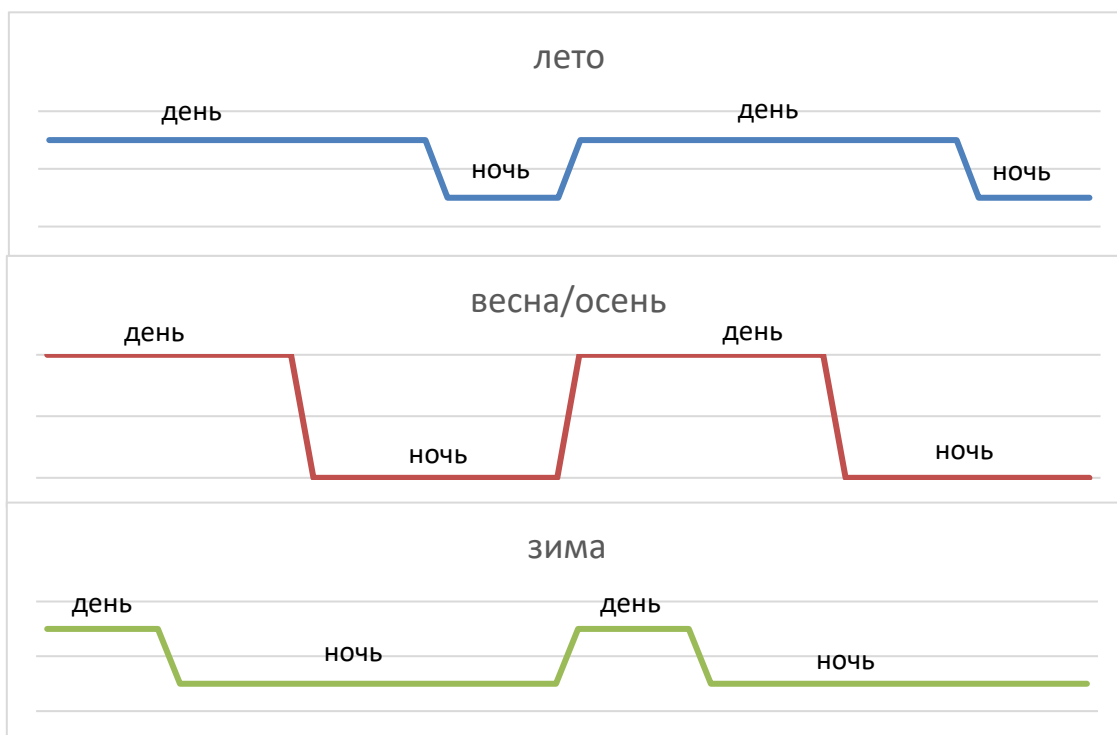


Рисунок 10. Графики получения/отдачи тепла аккумулятором