

УДК 621.039.578:629.78

## **Космическая ядерная энергетическая установка с паротурбинным преобразованием энергии**

Волчков Г.В., Выставкин А.Г..

### **Аннотация**

В настоящей конкурсной работе приведены результаты разработки проектного облика космической ядерной энергетической установки (ЯЭУ) с динамическим (паротурбинным) преобразованием энергии электрической мощностью 500 кВт. В работе представлены массогабаритные характеристики ЯЭУ и отдельных агрегатов, конструктивно-компоновочная схема изделия, предложены рекомендации по эксплуатации установки.

Полученные результаты могут быть использованы при создании транспортно-энергетического модуля на основе ЯЭУ мегаваттного класса.

### **Ключевые слова**

космический аппарат; ядерная энергетическая установка; паротурбинное преобразование энергии; паротурбинная установка

### **Введение**

Более 50-ти лет в России, единственной стране, обладающей реальной технологией создания космических ядерных энергетических установок (ЯЭУ), проводились с разной степенью интенсивности разработки ЯЭУ различного типа и назначения. Разработки были направлены на решение целого ряда перспективных задач для космической техники – как ближайшей, так и отдаленной перспективы. В космической энергетике ЯЭУ не только конкурируют с солнечными энергетическими установками (СЭУ) по своим массогабаритным и энергетическим показателям, но и в ряде случаев являются безальтернативными бортовыми источниками энергоснабжения. Проработанные в той или иной степени к

настоящему времени ЯЭУ способны перекрыть мощностной диапазон от десятков киловатт до десятков мегаватт, который может быть востребован в перспективе.

Использования ЯЭУ в составе космических аппаратов (КА) обусловлены их преимуществами по сравнению с другими бортовыми источниками энергоснабжения (СЭУ, аккумуляторными и другими), основными из которых являются:

- компактность;
- отсутствие фактора деградации;
- стойкость к воздействию радиационных поясов Земли;
- независимость от ориентации и расстояния КА относительно Солнца;
- возможность работы на разных уровнях мощности в процессе эксплуатации;
- наиболее выгодные массогабаритные характеристики при использовании на беспилотных КА, начиная с уровня электрической мощности в несколько десятков киловатт.

Использование ЯЭУ в составе перспективных КА в качестве основного источника электрической энергии может заметно расширить возможности КА при решении важнейших социально-экономических и оборонных задач.

Одной из возможных задач может быть использование ЯЭУ в составе транспортного энергетического модуля (ТЭМ), обеспечивающего транспортировку космических объектов на рабочие орбиты. В форсированном режиме ЯЭУ используется для питания электрореактивной двигательной установки ТЭМ, а в номинальном режиме – для энергоснабжения аппаратуры КА.

Основными направлениями разработки перспективных ЯЭУ в настоящее время являются ЯЭУ с прямым преобразованием тепловой энергии на основе ядерных реакторов со встроенными в активную зону термоэмиссионными преобразователями и ЯЭУ с динамическим преобразованием энергии по циклу Брайтона и циклу Ренкина.

Уверенное преимущество, по крайней мере, до уровня электрической мощности порядка 500 кВт имеют ЯЭУ на основе термоэмиссионного принципа преобразования энергии. При мощности от 500 кВт и выше масса термоэмиссионных ЯЭУ будет расти более интенсивно по сравнению с массами динамического варианта ЯЭУ. Опыт разработок ЯЭУ показал, что ЯЭУ с динамическим преобразованием энергии для космической энергетики перспективно применять, начиная с уровня электрической мощности 500 кВт и более. Они располагают большим потенциалом по увеличению электрической мощности при

массогабаритных характеристиках, отвечающих условиям их применения совместно с современными и перспективными КА.

Как вариант в данной работе разработан облик ЯЭУ на основе паротурбинного преобразования энергии.

## **1. Описание принципиальной схемы ЯЭУ**

В настоящей работе рассматривается схема ЯЭУ с паротурбинной установкой (ПТУ) электрической мощностью 500 кВт. На основании проведенных ранее проработок принята трехконтурная схема ЯЭУ со вспомогательной системой теплоотвода.

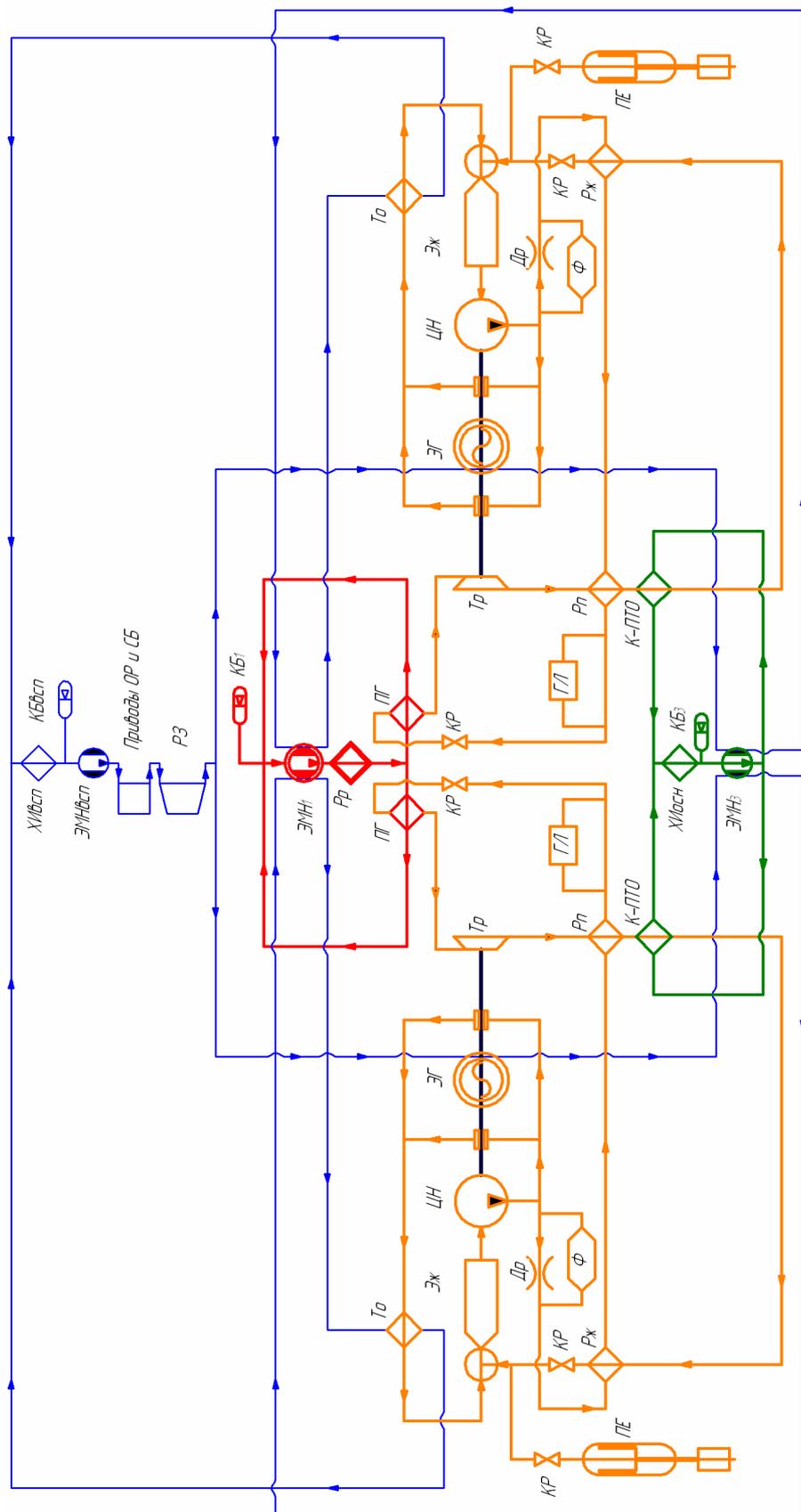
Принципиальная схема ЯЭУ представлена на рисунке 1. В первом контуре источником тепловой энергии является реактор на быстрых нейтронах. В составе ЯЭУ используются в качестве источников электрической энергии две ПТУ мощностью 250 кВт каждая. Тепло от реактора передается в ПТУ жидкометаллическим теплоносителем первого контура.

Во втором контуре в ПТУ нагрев до температуры кипения и испарение рабочего тела осуществляется в парогенераторе теплоносителем первого контура. Перегретый пар подаётся на турбину, после чего поступает в паровой регенератор, который позволяет несколько уменьшить количество тепла, отводимое через конденсатор в ХИ и одновременно уменьшить тепловую мощность парогенератора. В конденсаторе пар полностью конденсируется и переохлаждается. Жидкостный регенератор позволяет уменьшить переохлаждение рабочего тела в конденсаторе и снижает температуру рабочего тела на входе в эжектор. В эжекторе происходит смешение потоков теплоносителя второго контура, поступающего из гидростатических подшипников электрогенератора и из жидкостного регенератора. Рабочее тело из центробежного насоса разделяется на два потока, часть из которого подаётся в гидростатические подшипники электрогенератора, где отдает тепло в теплообменнике теплоносителю вспомогательного контура, и далее поступает в эжектор, а вторая часть – в жидкостный и паровой регенераторы, где частично подогревается, после чего нагревается до температуры кипения и испаряется в парогенераторе.

В третьем контуре тепло от конденсатора жидкометаллическим теплоносителем передаётся в холодильник-излучатель (ХИ) и сбрасывается в космическое пространство.

Вспомогательный контур, предназначен для охлаждения обмоток статора электрогенератора, обмоток электромагнитных насосов (ЭМН) первого и третьего контуров.

В состав вспомогательного контура входит теплообменник, вспомогательный ХИ, вспомогательный ЭМН, компенсационный бак (КБ) и трубопроводы.



ЭМН1 – насос электромагнитный 1 контура, ЭМН2 – насос электромагнитный 3 контура, ЭМН3 – насос электромагнитный 3 контура, ЭМН4 – насос электромагнитный 3 контура, ЭМН5 – насос электромагнитный 3 контура, ЭМН6 – насос электромагнитный 3 контура, КБ1 – бак компенсационный 1 контура, КБ2 – бак компенсационный 1 контура, КБ3 – бак компенсационный 1 контура, КБ4 – бак компенсационный 1 контура, КБ5 – бак компенсационный 1 контура, ЦН – насос центробежный, ЭЖ – эжектор, ЦН – насос центробежный, Др – дрессель, Ф – фильтр, ГЛ – ловушка горячая, То – емкость пусковая, КР – теплообменник, КР – клапан разделительный, Р3 – защита радиационная, ХИосн – холодильник-излучатель вспомогательный, ОР – орган регулирования, СБ – стержень безопасности.

- первый контур
- второй контур
- третий контур
- вспомогательный контур

Рисунок 1. Принципиальная схема

В качестве теплоносителя первого контура используется литий, обладающий наилучшими теплофизическими свойствами среди жидкометаллических теплоносителей.

Рабочим телом второго контура является калий, теплофизические свойства которого наиболее полно отвечают условиям работы парожидкостного контура для выбранного диапазона температур. В третьем и вспомогательном контуре теплоносителем является эвтектический сплав натрия-калия.

Прокачка теплоносителей первого, третьего, и вспомогательного контуров осуществляется ЭМН.

Температурное расширение теплоносителей компенсируется КБ, которые также предотвращают кавитацию теплоносителей на входе в ЭМН.

Во втором контуре установлены фильтры и ловушки, поддерживающие необходимую чистоту теплоносителя. Чистота теплоносителей остальных контуров обеспечивается соответствующим качеством заправки.

Для обеспечения разогрева перед пуском первого контура предусмотрен пусковой контур.

## **2. Термодинамический цикл**

ПТУ работает по термодинамическому циклу Ренкина (рис. 2). Цикл состоит из двух изобар и двух адиабат, т.е. изобары подвода теплоты к жидкому рабочему телу и его парам при наивысшем давлении, изобары отвода теплоты отработанного пара (до его полной конденсации), адиабаты сжатия жидкого рабочего тела в насосе и адиабаты расширения пара в турбине.

Выбор такого цикла определяют два главных фактора: очень малая работа сжатия и наибольшая простота осуществления изобарных процессов подвода теплоты и адиабатных процессов расширения и сжатия.

Для проектируемой ЯЭУ электрической мощностью 500 кВт наиболее целесообразно в качестве рабочего тела принять калий.

Температуру на входе в турбину  $T_7$  термодинамически выгодно иметь максимально высокой. Для лопаток турбины выполненных из сплавов на основе ниобия типичным значением является 1300К.

Для определения оптимальных массогабаритных характеристик установки температуру  $T_8$  приняли в диапазоне от 850К до 1050К, который разбили с шагом 50К. Для каждого  $T_8$  из шести вариантов был проведен расчет массогабаритных характеристик.

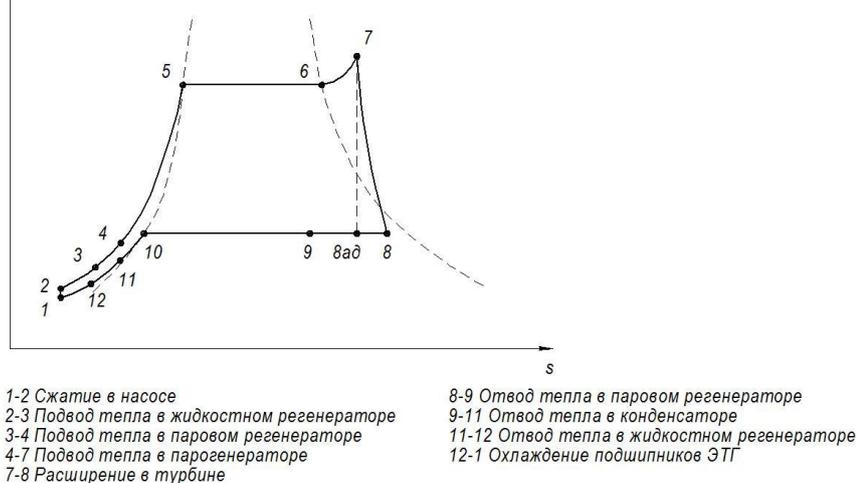


Рисунок 2. Цикл Ренкина

Сухость пара на выходе из турбины  $\chi$  для всех щелочных металлов лежит в пределах 0,82 – 0,9 при КПД турбины  $\eta_T \leq 0,8$ . В расчётах задавались адиабатическая сухость на выходе из турбины 0,85 при КПД турбины 0,8.

Устойчивая и надёжная работа центробежного насоса обеспечивается при температуре рабочего тела  $\sim 640\text{К}$ . Повышением температуры РТ в насосе за счёт сжатия можно пренебречь вплоть до давлений 4 – 5 МПа [1].

Температуры горячего калия на входе в регенераторы примем на  $\sim 10\text{К}$  выше температур холодного калия на выходе регенераторов.

Теплофизические параметры калия взяты из [2].

Результаты расчёта приведены в таблицах 2.1, 2.2 и 2.3.

Энтальпия калия в характерных точках цикла,  $\text{кДж/кг}$

Таблица 2.1

№ вар	$i_2$	$i_3$	$i_4$	$i_5$	$i_6$	$i_7$	$i_8$	$i_9$	$i_{10}$	$i_{11}$	$i_{12}$
1	333	371	447	652	2567	2771	2308	2231	4555	379	340
2		409	485	694	2582	2747	2317	2240	4936	417	
3		447	523	745	2630	2721	2325	2249	5317	454	
4		485	562	793	2618	2695	2334	2257	5704	493	
5		524	601	830	2632	2668	2342	2265	6097	531	

6		563	641	853	2641	2643	2351	2273	6497	571	
---	--	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	-----	--

Температура калия в характерных точках цикла,  $K$

Таблица 2.2

№ вар	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$	$T_8$	$T_9$	$T_{10}$	$T_{11}$	$T_{12}$
1	640	690	790	1053	1053	1300	800	800	800	700	650
2		740	840	1104	1104		850	850	850	750	
3		790	890	1167	1167		900	900	900	800	
4		840	940	1224	1224		950	950	950	850	
5		890	990	1268	1268		1000	1000	1000	900	
6		940	1040	1293	1293		1050	1050	1050	950	

Работа турбины  $h$ , адиабатическая работа турбины  $h_{ад}$ , давление пара калия на входе в турбину  $p_7$ , давление пара калия на выходе из турбины  $p_8$

Таблица 2.3

№ вар	$h$ , кДж/кг	$h_{ад}$ , кДж/кг	$p_7$ , бар	$p_8$ , бар
1	463	578	1.305	0.061
2	430	538	2.072	0.1274
3	396	495	3.157	0.2441
4	361	451	4.411	0.4357
5	326	407	5.74	0.7322
6	291	364	7.085	1.217

### 3. Тепловой баланс

Тепловой баланс рассчитан для одного паротурбинного блока мощностью 250 кВт. Теплофизические параметры лития и калия взяты из [2].

Работа турбины равна разности энтальпий на входе в турбину и на выходе из турбины.

$$h = i_7 - i_8 \quad (3.1)$$

Тепловые мощности насосов равны

$$Q_H = \frac{G_V \Delta p}{\eta} \quad (3.2)$$

где  $G_V$  – объёмный расход рабочего тела;

$\Delta p$  – напор рабочего тела;

$\eta$  – КПД насоса.

На основе опытных данных, анализируя условия работы насосов, можно задаться их КПД в первом приближении. КПД ЭМН первого контура примем равным 9%; КПД центробежного насоса второго контура – 80%; КПД ЭМН третьего контура – 25%. Тепловая мощность ЭМН вспомогательного контура – 10 кВт. Напор ЭМН обычно не превышает 1 атм. Напор центробежного насоса равен давлению насыщенных паров калия на входе в турбину с поправкой на гидродинамическое сопротивление парогенератора и гидростатических подшипников, в первом приближении 5 атм.

Мощность электрогенератора с учетом потерь на трение и охлаждение подшипников

$$Q_{alt} = \frac{N_{ycm} + Q_{H1} + Q_{H3} + Q_{H4}}{\eta} \quad (3.3)$$

где  $N_{ycm}$  – мощность одного паротурбинного блока;

$\eta$  – КПД электрогенератора, обычно не превышает 0,92;

$Q_{H1}$ ,  $Q_{H3}$ ,  $Q_{H4}$  – потребляемые мощности насосов первого, третьего и четвёртого контуров соответственно.

Мощность на валу турбины

$$Q_{tur} = Q_{alt} + Q_{H2} \quad (3.4)$$

Расход калия через турбину

$$G_2 = \frac{Q_{tur}}{h} \quad (3.5)$$

Тепловая мощность конденсатора

$$Q_{con} = G_2 (i_9 - i_{11}) \quad (3.6)$$

Тепловая мощность холодильника-излучателя

$$Q_{ref} = Q_{con} \quad (3.7)$$

Расход NaK в третьем контуре

$$G_3 = \frac{Q_{ref}}{Cp_3 \Delta T} \quad (3.8)$$

где  $Cp_3$  – теплоемкость NaK;

$\Delta T = 100K$  – разность температур на входе и выходе из ХИ.

Тепловая мощность регенератора парового

$$Q_{steamreg} = G_2(i_8 - i_9) \quad (3.9)$$

Тепловая мощность регенератора жидкостного

$$Q_{liquidreg} = G_2(i_{11} - i_{12}) \quad (3.10)$$

Тепловая мощность парогенератора

$$Q_{steamreg} = G_2(i_8 - i_9) \quad (3.11)$$

Тепловая мощность реактора

$$Q_{reactor} = Q_{boiler} \quad (3.12)$$

Расход лития

$$G_1 = \frac{Q_{reactor}}{Cp_3(T_{ex} - T_{вых})} \quad (3.13)$$

где  $T_{ex} = 1300K$  – температура на входе в реактор;

$T_{вых} = 1400K$  – температура на выходе из реактора.

КПД установки

$$\eta = \frac{N_{ycm}}{Q_{reactor}} \quad (3.14)$$

Результаты расчёта приведены в таблице 3.

Таблица 3

№ вар.	$G_1,$ кг/с	$G_2,$ кг/с	$G_3,$ кг/с	$Q_{steamreg},$ кДж	$Q_{liquidreg},$ кДж	$Q_{cond},$ кДж	$Q_{boiler},$ кДж	$\eta, \%$
1	3.65	0.65	14.30	50.5	25.6	1216	1525	16.4
2	3.84	0.71	15.22	54.6	54.7	1294	1606	15.6
3	4.08	0.77	16.39	59.0	89.3	1394	1707	14.6
4	4.38	0.85	17.82	66.1	131.6	1515	1832	13.6
5	4.74	0.96	19.56	73.9	184.2	1663	1983	12.6
6	5.19	1.09	21.72	84.6	250.8	1847	2172	11.5

В ходе предварительных оценочных расчётов были получены массы реактора, радиационной защиты, теплообменного оборудования, ЭМН, ХИ, силовых элементов конструкции и кабельных линий. Анализируя результаты, мы пришли к выводу, что вариант

установки под номером 4 имеет наименьшую массу по сравнению с остальными (рис. 3), который и был принят для дальнейших конструкторских проработок.

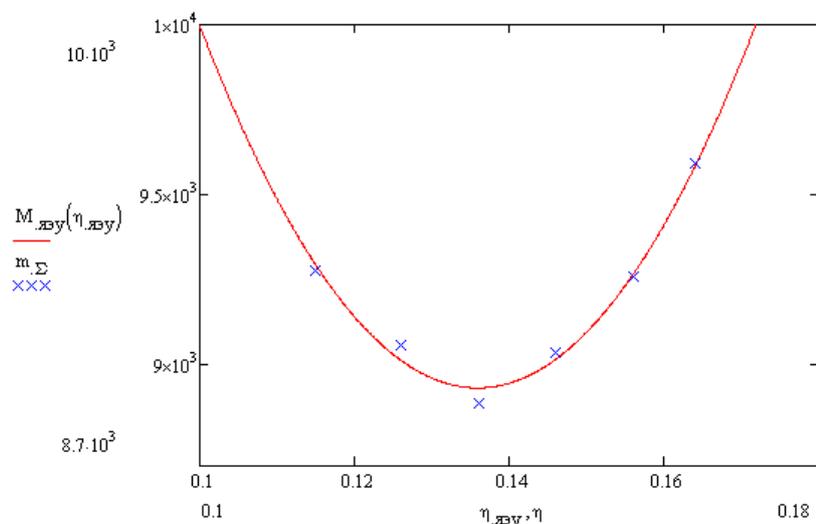


Рисунок 3. Зависимость массы ЯЭУ от КПД

#### 4. Основные параметры агрегатов ЯЭУ

##### Реактор

Реактор на быстрых нейтронах, активная зона которого содержит 49 тепловыделяющих сборок, шесть стержней безопасности 12 органов регулирования раздвижного типа. Основной конструкционный материал – ВН-2А.

Реактор

Таблица 4.1.

Теплоноситель	Литий
Тепловая мощность, кВт	3664
Температура на входе, К	1300
Температура на выходе, К	1400
Расход теплоносителя, кг/с	4.38
Габариты, мм	1117x Ø 640
Масса, кг	900

##### Радиационная защита

В ЯЭУ используется тeneвая многокомпонентная охлаждаемая радиационная защита (РЗ). В конструкции РЗ для обеспечения ее теплового состояния в легком компоненте установлена система теплоотвода. При этом структура РЗ традиционна для реакторов такой мощности. Первым слоем идет тепловая защита – бериллий, затем тяжелый компонент – обедненный уран 238 и легкий компонент, в качестве которого использован гидрид лития. Выбор материалов РЗ проведен согласно расчёту РЗ по методике [3].

Радиационная защита

Таблица 4.2.

Теневого угла, °	44
Толщина тяжелого компонента, мм	150
Толщина легкого компонента, мм	846
Суммарная масса, кг	2800

### Турбогенератор

Турбогенератор имеет в своём составе три основных узла: турбину, электрогенератор и центробежный насос, установленные на одном валу.

Пар калия подаётся на входное устройство турбогенератора, расширяется на турбине и через паровыпускное устройство направляется в паросборник. Турбина вращает ротор электрогенератора и центробежный насос. Охлаждение гидростатических подшипников осуществляется жидким калием, подающимся центробежным насосом.

Основной конструкционный материал – ВН-2А.

Для данной ЯЭУ были взяты ранее спроектированные турбогенераторы мощностью по 250 кВт. В агрегатном отсеке турбогенераторы располагаются симметрично и имеют разнонаправленное вращение турбин, что компенсирует вращающий момент.

Турбогенератор

Таблица 4.3.

Тип турбины	Осевая активная двухступенчатая
Число оборотов, об/мин	15000
Давление пара калия на входе в турбину, МПа	0.441

Расход пара калия, кг/с	0.85
Температура пара калия, К	
на входе в турбину	1300
на выходе из турбины	950
Тип турбины	Осевая активная двухступенчатая
КПД турбины	0,8
Мощность электрическая, кВт	304
Насос второго контура (встроенный)	Центробежный со спиральным отводом
Напор, Па	5,441
Расход калия через насос, кг/с	3,85
Температура калия на входе в насос, °С	640
Габариты турбогенератора, мм	
Длина	980
Диаметр	380
Масса, турбогенератора, кг	500

### Электромагнитные насосы

Конструкция ЭМН состоит из трех основных узлов: канала, внутреннего магнитопровода (сердечника), индуктора с обмоткой.

Тонкостенный канал, образованный наружной и внутренней стенкой, имеет цилиндрическую форму и служит проточной частью перекачиваемого теплоносителя.

#### Характеристики ЭМН

Таблица 4.4.

Контур	Тепло-носитель	Температура теплоносителя, К	Расход кг/с	Напор, 10 <sup>5</sup> Па	КПД, %	Мощность, кВт	Габариты, мм	Масса, кг
1	Литий	1200	4,2	1	9,0	11	1050х Ø450	320
3	Натрий-калий	890	19,5	1	25,0	8.9	1000х Ø440	300
4	Натрий-калий	200	-	-	-	10	320х Ø180	120

## **Парогенератор**

Парогенератор – рекуперативный противоточный теплообменный аппарат, конструктивно выполненный в виде кожухо-трубного теплообменника с плавающей трубной доской и сильфоном для компенсации разности температурных напряжений. В межтрубном пространстве течёт греющий теплоноситель – литий, испарение калия происходит в трубах. В зоне входного патрубка вварен дефлектор, препятствующий размыванию парогенерирующих труб потоком лития в зоне повышенных скоростей.

Жидкий калий второго контура через входной патрубок, снабженный рассекателем потока, поступает в парогенерирующие трубы. В начале каждой трубы установлен дроссель, а за ним – шнек-завихритель. Дроссели служат для равномерного распределения расхода калия по трубам и уменьшению пульсаций в парогенерирующей трубе. Шнеки-завихрители предназначены для увеличения скорости и создания закрутки потока в области малых паросодержаний смеси. Это препятствует возникновению плёночного кипения.

Насыщенный пар подаётся к сопловому аппарату турбины.

Вся конструкция выполнена из сплава ВН-2А.

## **Конденсатор**

Конденсатор – рекуперативный противоточный теплообменный аппарат, конструктивно выполненный в виде кожухо-трубного теплообменника с плавающей трубной доской и сильфоном для компенсации разности температурных. В трубах течёт охлаждающий теплоноситель – эвтектическая смесь натрия и калия, конденсация калия происходит в межтрубном пространстве.

Конденсатор конструктивно совмещён с паровым регенератором, в межтрубном пространстве которого течёт подогреваемый теплоноситель – жидкий калий. В трубах течёт охлаждаемый теплоноситель – пар калия. Жидкий калий подогревается за счёт частичного увлажнения пара калия.

## **Жидкостный регенератор**

Регенератор жидкостный – рекуперативный противоточный теплообменный аппарат, конструктивно выполненный в виде кожухо-трубного теплообменника с плавающей трубной доской и сильфоном для компенсации разности температурных напряжений. В межтрубном пространстве течёт подогреваемый теплоноситель – жидкий калий, охлаждение жидкого калия происходит в трубах.

Вся конструкция выполнена из сплава ВН-2А.

## **5. Описание конструкции ЯЭУ**

ЯЭУ выполнена в «жестком» виде, без технически сложных элементов системы раздвижения.

На рисунке 4 представлена конструктивно-компоновочная схема ЯЭУ, включающая в свой состав верхний блок и нижний блок. В результате расчетов параметров агрегатов и элементов конструкции и в ходе проведённых и компоновочных работ компоновочных работ получены следующие габаритные размеры ЯЭУ 20 м в длину и 4,4 м в диаметре. При этом геометрические размеры РЗ полученные расчетным путем и удаление центра активной зоны реактора от дозовой плоскости КА обеспечивают заданный интегральный поток ионизирующих излучений на приборный отсек КА.

В состав верхнего блока входят реакторный модуль, агрегатный отсек с двумя ПТУ, панели вспомогательного ХИ, силовая рама верхнего блока, трубопроводы системы теплоотвода (СТО).

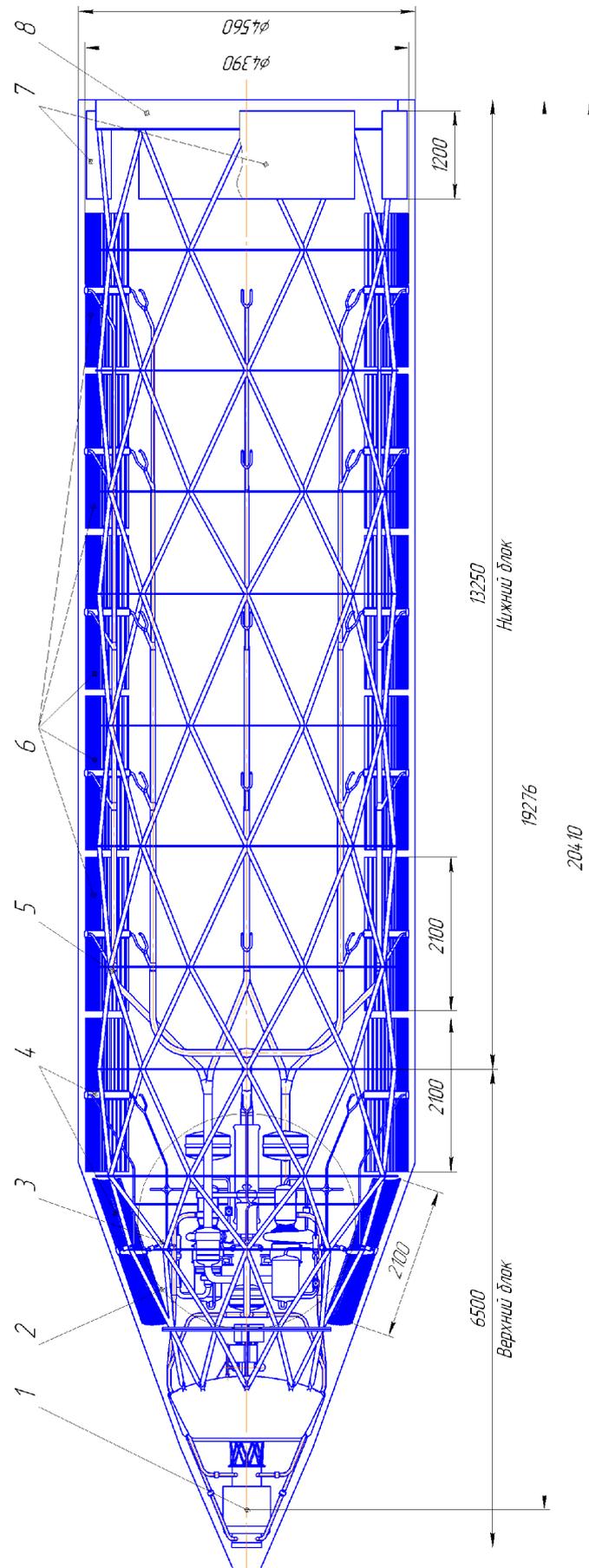
В состав нижнего блока входят панели основного ХИ, силовая рама нижнего блока, балластное сопротивление излучательного типа (БСИТ), стыковочный модуль и трубопроводы СТО.

Реакторный модуль включает в свой состав реактор, раму реакторного отсека, компоненты РЗ, приводы стержней безопасности (СБ) и органов регулирования (ОР) с рессорами.

Агрегатный отсек включает в свой состав агрегаты двух блоков ПТУ, три ЭМН и три КБ (рис. 5).

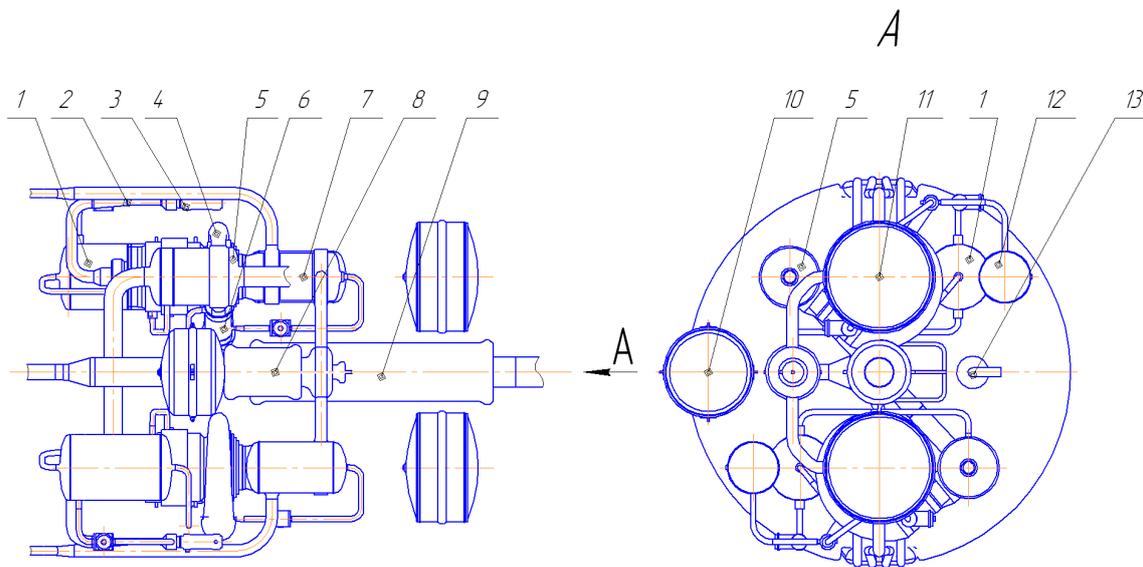
Блоки ПТУ расположены симметрично относительно продольной оси изделия. По оси изделия расположен ЭМН третьего контура. ЭМН первого контура и ЭМН вспомогательного контура расположены параллельно ЭМН третьего контура со смещением относительно продольной оси изделия.

Панели вспомогательного ХИ расположены на силовой раме верхнего блока. Первая секция ХИ расположена на конической части рамы над агрегатным отсеком, вторая секция на цилиндрическом участке рамы. Панели основного ХИ расположены на силовой раме нижнего блока.



1 – Блок реакторный; 2 – отсек агрегатный; 3 – рама силовая верхнего блока; 4 – ХИ вспомогательный; 5 – рама силовая нижнего блока; 6 – ХИ основной; 7 – БСИТ; 8 – блок стькабачный.

Рисунок 4. Конструктивно – компоновочная схема ЯЭУ электрической



1 – регенератор жидкостный; 2 – эжектор; 3 – теплообменник; 4 – турбогенератор; 5 – конденсатор; 6 – регенератор паровой; 7 – парогенератор; 8 – насос электромагнитный 1 контура; 9 – насос электромагнитный 3 контура; 10 – бак компенсационный 1 контура; 11 – бак компенсационный 3 контура; 12 – емкость пусковая; 13 – насос электромагнитный вспомогательного контура.

Рисунок 5. Агрегатный отсек ЯЭУ

Панели основного и вспомогательного ХИ выполнены аналогично с использованием тепловых трубы (ТТ), заделанных в проточных коллекторах. Подвод теплоносителя к коллекторам основного ХИ осуществляется по четырем магистральным трубопроводам из двух конденсаторов и возвращается по возвратным трубопроводам в ЭМН третьего контура.

Во вспомогательном ХИ теплоноситель подается в коллекторы из двух теплообменников и возвращается в ЭМН вспомогательного контура.

Кабельные линии от агрегатного отсека до электрических соединителей стыковочного модуля прокладываются между панелями основного ХИ над возвратными трубопроводами в теплоизолированных ложементах, закрепленных на силовой раме.

Выполненные компоновочные работы показывают, что вывод ЯЭУ на орбиту способен осуществить РН «Ангара-А5», имеющий габариты под обтекателем 20 м в длину и 4,4 м в диаметре и массу полезной нагрузки порядка 20-25 тонн. Но при этом в зоне полезной нагрузки не представляется возможным разместить АКК. Поэтому предлагается использовать двухпусковую схему выведения КА. Один РН выводит на орбиту ЯЭУ, а второй РН выводит АКК. После стыковки АКК с ЯЭУ осуществляется довыведение космического комплекса на достаточно высокую орбиту, где осуществляется пуск ЯЭУ.

## 6. Массовые характеристики ЯЭУ

Массовые характеристики по основным элементам ЯЭУ

Таблица 6.1

№п/п	Наименование элемента, системы	Масса, кг
1	Головной модуль	3840
2	Агрегатный отсек	2028
3	Система теплоотвода	2498
4	Силовые элементы конструкции	3139
5	Крепежные элементы	401
6	Стыковочный модуль и БСИТ	300
	ИТОГО	12400

### Заключение

В настоящей работе получены массогабаритные характеристики и конструктивно компоновочная схема ЯЭУ с ПТУ электрической мощностью 500 кВт. Эти данные используются в сравнительном анализе массогабаритных характеристик ЯЭУ с динамическим преобразованием энергии и в частности в разработке ЯЭУ мегаваттного класса.

### Перечень принятых сокращений и условных обозначений

АКК – аппаратурно-космический комплекс

БСИТ – балластное сопротивление излучающего типа

КА – космический аппарат

КБ – компенсационный бак

ОР – орган регулирования

ПТУ – паротурбинная установка

РЗ – радиационная защита

РН – ракетоноситель  
САУ – система автоматического управления  
СБ – стержень безопасности  
СТО – система теплоотвода  
ТТ – тепловые трубы  
ТЭМ – транспортный энергетический модуль  
ХИ – холодильник-излучатель  
ЭМН – электромагнитный насос  
ЯЭУ – ядерная энергетическая установка

### **«Библиографический список»**

1. Андрющенко А.И. Основы термодинамики циклов теплоэнергетических установок: Учеб. пособие для теплоэнергет. спец. вузов. Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: «Высшая школа», 1985, 319 с – ил.
2. Н. Б. Варгафтик. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: «Наука», 1972, 720 с – ил.
3. А.Г. Ерёмин, М.Ю.Фёдоров. Конструкция и расчёт радиационной защиты космической ЯЭУ. Учеб. пособие. – М.: МАИ, 2009, 59с.

### **Сведения об авторах**

Волчков Григорий Валерьевич, инженер-конструктор II кат.  
РОСАТОМ ФГУП «Красная Звезда»,  
электролитный проезд, д. 1а, Москва, 115230;  
тел.: (916) 734-02-25;  
e-mail: [grinch84@bk.ru](mailto:grinch84@bk.ru)

Выставкин Алексей Георгиевич, инженер-конструктор III кат.  
РОСАТОМ ФГУП «Красная Звезда»,  
электролитный проезд, д. 1а, Москва, 115230;  
тел.: (926) 217-91-03;

e-mail: [vystavkinag@mail.ru](mailto:vystavkinag@mail.ru)