

Лекция 12 Малая ядерная энергетика

- На основе опыта создания и эксплуатации судовых и корабельных реакторов в ОАО «ОКБМ Африкантов» разработан ряд проектов реакторных установок для автономных атомных энергоисточников малой мощности в диапазоне от 6 до 100 МВт(эл).
- Они предназначены для комплексного электро- и теплоснабжения (как бытового, так и промышленного) изолированных потребителей в удаленных районах, не имеющих централизованного энергоснабжения, с дорогим дальнепривозным топливом.
- В России это крупные населенные пункты и порты вдоль Северного Морского пути и побережья Дальнего Востока, месторождения полезных ископаемых, военные базы; за рубежом - прибрежные районы развивающихся стран.
- **готовые к реализации проекты энергоисточников малой мощности АБВ-6М и КЛТ-40С предполагают размещение атомной энергетической установки на суше и на несамоходных плавучих средствах**

Общий вид плавучего энергоблока с реакторными установками КЛТ-40С

ПАТЭС

**ПЛАВУЧИЙ ЭНЕРГОБЛОК
С РЕАКТОРНЫМИ УСТАНОВКАМИ
КЛТ-40С**





- Первую электроэнергию в изолированную сеть Чаун-Билибинского энергоузла Чукотки ПАТЭС выдала 19 декабря 2019 года. Международный журнал Power признал это событие одним из шести ключевых событий года в мировой атомной энергетике.
- С момента включения в сеть ПАТЭС уже выработала свыше 47,3 млн кВт.ч электроэнергии, сейчас она обеспечивает 20% потребности в электроэнергии Чаун-Билибинского энергоузла.
- после вывода Билибинской АЭС из эксплуатации, ПАТЭС будет основным источником энергоснабжения Чукотки.

- Первую электроэнергию в изолированную сеть Чаун-Билибинского энергоузла Чукотки ПАТЭС выдала 19 декабря 2019 года.
- Международный журнал Power признал это событие одним из шести ключевых событий года в мировой атомной энергетике.
- С момента включения в сеть ПАТЭС уже выработала свыше 47,3 млн кВт.ч электроэнергии, сейчас она обеспечивает 20% потребности в электроэнергии Чаун-Билибинского энергоузла.
- А после вывода Билибинской АЭС из эксплуатации, ПАТЭС будет основным источником энергоснабжения Чукотки.

Технические характеристики:

- количество РУ 2 шт.,
- эл. мощность в конденсационном режиме, МВт -2х38,5 ,
- отпуск тепла, Гкал/ч - 2х73,
- номинальная производительность по опресненной воде -100000, м³/сут.,
- КИУМ-0,8,
- периодичность перегрузки топлива- 2,5года, периодичность заводского ремонта – 12 лет.

Системы безопасности РУ КЛТ-40С.

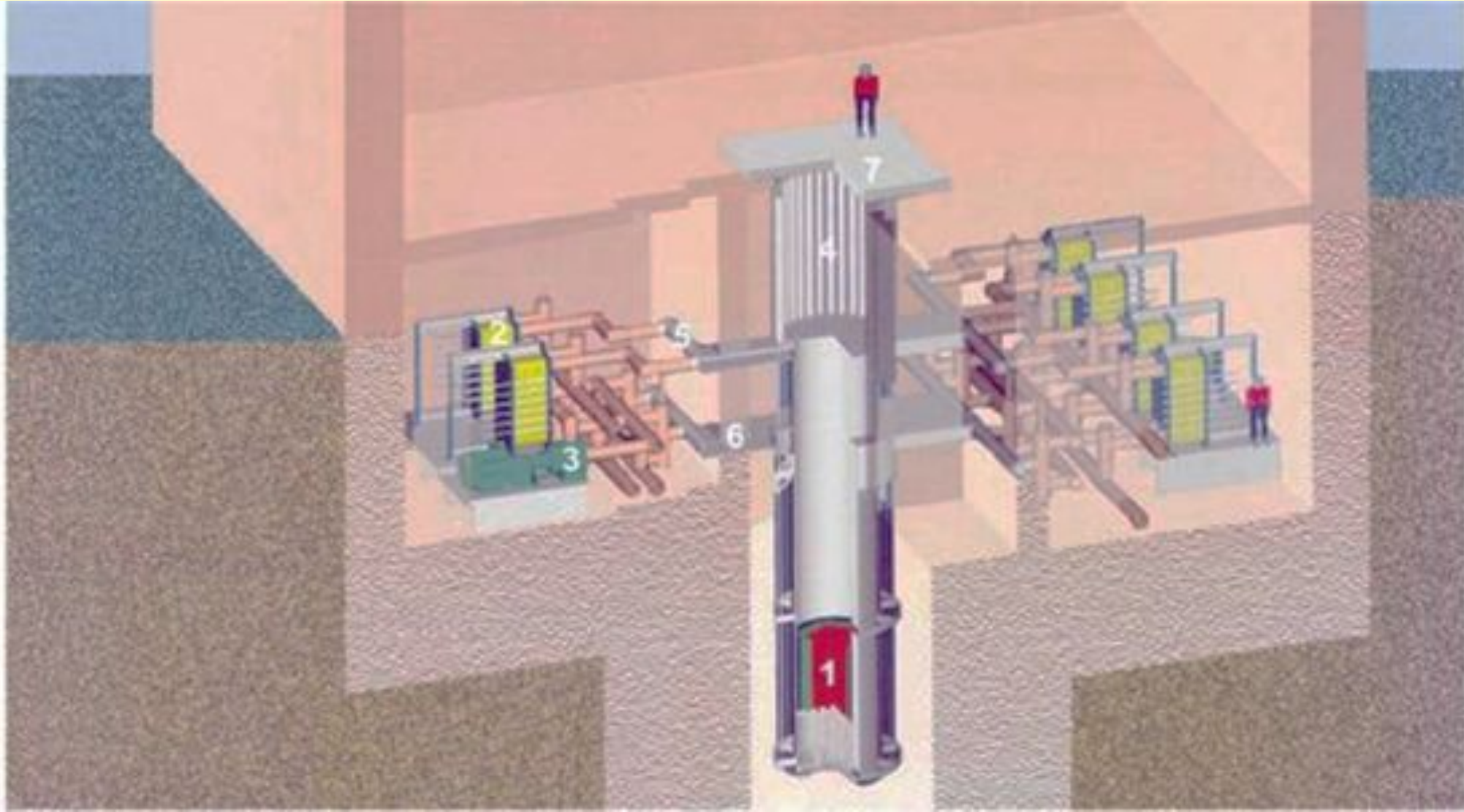
Характеристика	КЛТ-40С	КЛТ-40
Время поддержания активной зоны в аварии с потерей теплоносителя	1,5 ч	5-10 мин
Время функционирования пассивной САР	24 ч	3 ч
Возможность инициирования срабатывания АЗ без участия электрических управляющих систем безопасности	есть	нет
Возможность удержания расплава активной зоны в корпусе реактора	есть	Нет
Наличие пассивных систем ограничения давления в ЗО	есть	нет
Наличие сброса среды из ЗО в процессе тяжелой аварии	нет	Есть

Ядерная установка теплоснабжения с бассейновым реактором РУТА

- Радиационное воздействие установок РУТА на окружающую среду не только при нормальной эксплуатации, но и при любых реально возможных аварийных ситуациях не будет превышать уровня, соответствующего естественному радиационному фону.**
- Установки такого типа могут располагаться в непосредственной близости от населенных пунктов.**
- На рис.5 представлен реактор бассейнового типа РУТА**

Рис. 5 Реактор бассейнового типа РУТА

1 - активная зона, 2-теплообменник первичный, 3 насос, 4- привод системы управления и защиты, 5- раздающий коллектор первого контура, 6- сборный коллектор первого контура, 7- верхнее перекрытие



Основные технические характеристики реактора РУТА 70.

- **Максимальная тепловая мощность реактора, МВт 70**
- **Размеры активной зоны (экв. диаметр/высота), м 1,42/1,40**
- **Топливо кермет (0,6 UO_2 +0,4 сплав Al)**
- **Обогащение топлива ураном-235, % 4,2**
- **Загрузка урана в активную зону, кг 4165**
- **Количество тепловыделяющих сборок (ТВС) 91**
- **Кампания ядерного топлива, эфф. Сутки 2332**
- **Время работы между перегрузками при коэффициенте использования установленной мощности 0,7, календарных лет 3**
Доля перегружаемого топлива 1/3
- **Объем воды в баке реактора, м³ 250**
- **Температура в активной зоне (вход/выход), °С 75/101**

Все страны-разработчики судовых ЯЭУ остановили свой выбор на реакторе ВВЭР

- Накопленный опыт свидетельствует о достаточно высоком уровне безопасности судовых ЯЭУ, однако и впредь при разработке новых проектов задача обеспечения гарантированной безопасности должна быть в центре внимания проектантов. Целесообразно использовать рекомендации МАГАТЭ и для судовых ЯЭУ. При этом, конечно, должны учитываться их специфика,

Наиболее перспективной ныне считается интегральная компоновка оборудования реакторной части судовой ЯЭУ

- . Ее достоинства обусловлены тем, что **весь объем теплоносителя первого контура реакторной установки локализуется в одном корпусе, все оборудование первого контура также размещается в этом корпусе, исключаются неотсекаемые участки первого контура на случай разгерметизации, резко уменьшается число корпусных конструкций, арматуры, снимается опасность достижения критического значения флюенса нейтронов на корпус реактора.**

по ремонтпригодности она заметно уступает и петлевой, и блочной компоновкам.

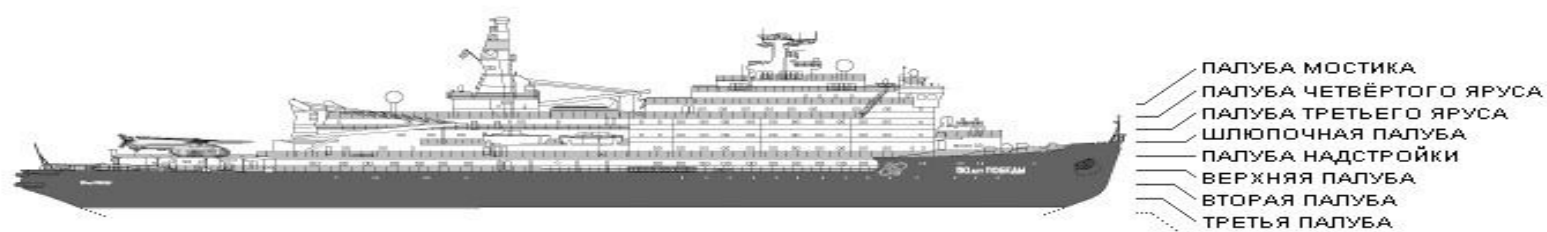
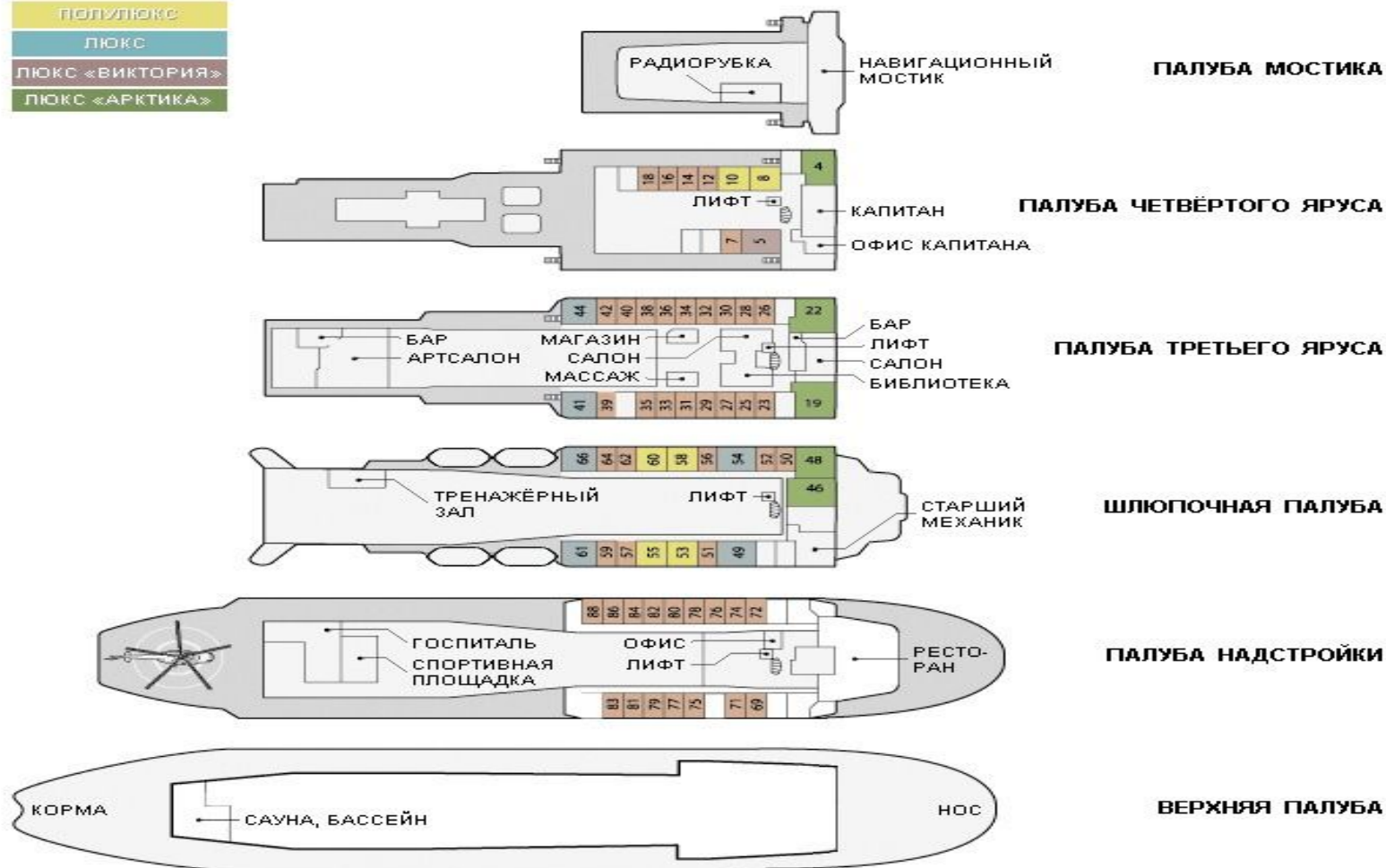
Россия располагает атомным флотом гражданского назначения: девятью ледоколами с двухреакторными и однореакторными ЯЭУ и одним контейнеровозом ледового плавания.

- Первыми судами с ядерными энергетическими установками были: в СССР - атомный ледокол "Ленин" (1959), в США - торговое судно "Саванна" (1960), в Германии - рудовоз "Отто Ган" (1968) и в Японии - экспериментальное судно "Муцу" (1972).
- Однако только в СССР строительство судов с ЯЭУ получило коммерческое продолжение и развитие
- . **Новейший из атомных ледоколов России – «50 лет Победы»,** является самым большим и мощным ледоколом в мире. Он представляет собой модернизированный проект второго поколения (серии) линейных атомных ледоколов типа «Арктика»
- – мощнейших из когда-либо построенных. «50 лет Победы» - проект 10521 построен на верфи «Балтийский завод» и оснащён сложнейшим современным оборудованием. **Это первый атомоход - построенный в России с 1990 года.**

ПЛАН ПАЛУБ АТОМНОГО ЛЕДОКОЛА «50 ЛЕТ ПОБЕДЫ»

КАТЕГОРИИ ПАССАЖИРСКИХ КАЮТ ДЛЯ ТУРИСТОВ:

- СТАНДАРТНАЯ
- ПОЛУЛЮКС
- ЛЮКС
- ЛЮКС «ВИКТОРИЯ»
- ЛЮКС «АРКТИКА»



Тепловая схема АППУ состоит из 4-х контуров:

- **Через активную зону реактора прокачивается теплоноситель I контура (вода высокой степени очистки). Вода нагревается до 317°C.,** Из реактора теплоноситель 1 контура поступает в парогенератор, омывая трубы, внутри которых протекает вода II контура, превращающаяся в перегретый пар.
- **Из парогенератора перегретый пар поступает на главные турбины** производства Кировского завода, каждая из которых, в свою очередь, состоит из трёх турбогенераторов. Параметры пара перед турбиной: давление - 30 кгс/см² (2,9 МПа), температура - 300°C.
- Затем пар конденсируется, вода проходит систему ионообменной очистки и снова поступает в парогенератор.
- **III контур предназначен для охлаждения оборудования АППУ,** в качестве теплоносителя используется вода высокой чистоты (дистиллят). Теплоноситель III контура имеет незначительную радиоактивность.
- **IV контур служит для охлаждения воды в системе III контура,** в качестве теплоносителя используется морская вода. Также IV контур используется для охлаждения пара II контура при расхолаживании установки

Космические ЯЭУ

- **Основные направления гражданской тематики космической ядерной энергетики это связь, телевидение, мировой мониторинг.**
- все это можно делать более интенсивно с использованием ядерной энергетики, поместив, допустим, объект на геостационарную орбиту. Четыре таких объекта позволяют оглядеть с целью мониторинга всю планету разом.
- **Второе направление – колонизация Луны и пилотируемая экспедиция на Марс.** Кардинально проблему решает только ядерная энергетика.

Сегодня НИИАР, ОАО «НИКИЭТ», ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», ФГУП «НИИ «НПО «Луч», ФГУП «Красная Звезда», участвует в проекте «Космические ядерные энергоустановки».

- **В рамках этого уникального прорывного проекта создается космический транспортно-энергетический модуль на основе ядерной энергодвигательной установки. Эскизный проект модуля должен быть закончен к 2012 году. Отработка ядерной двигательной установки намечена на 2015-й, а создание самого модуля начнется в 2025 году.**
- **Реализация проекта позволит наладить производство в космосе, в условиях глубокого вакуума, таких материалов, которые невозможно получить в земных условиях. И в первую очередь это касается наноструктур с ультравысокими свойствами.**
- **Благодаря этому проекту появится возможность выйти на создание систем энергоснабжения Земли из космоса, бороться с астероидно-кометной опасностью и очищать околоземную орбиту от космического мусора.**

Развитие космических ядерных энергетических установок (КЯЭУ) - актуальная задача атомной и космической отраслей

- **Государственными программами** предусматривается значительное повышение роли космической отрасли в решении народно-хозяйственных задач по освоению труднодоступных регионов Российской Федерации. Перспективой развития нового поколения космических аппаратов является решение проблемы их **независимости от солнечного излучения**.
- **Стратегия** развития космической ядерной энергетики до 2030 г., утвержденная Указом Президента РФ №80 от 27.02.2019, определяет развитие космических ядерных энергетических установок (КЯЭУ) как актуальную задачу атомной и космической отраслей на ближайшее десятилетие.

Особенности целевого назначения, условий эксплуатации, последовательности стадий жизненного цикла КЯЭУ в значительной степени определяют круг новых современных научных проблем, подлежащих решению для достижения их высокой надежности в течение длительного ресурса безопасности и экологической приемлемости всех стадий ЖЦ – от изготовления до утилизации – КЯЭУ как автономных источников генерации энергии с ограниченными возможностями их технического обслуживания и ремонта при длительных сроках эксплуатации.

Задачи исследований

- Разработка концепции комплексной информационной модели как средства реализации единой методологии и принципов построения комплексной системы управления жизненным циклом, техническим состоянием и безопасностью КЯЭУ;
- Разработка алгоритмических и программных средств обоснования ресурсной надежности и экологической приемлемости стадий жизненного цикла КЯЭУ;
- Разработка методов оптимизации эксплуатационных режимов КЯЭУ как средств повышения проектного срока эксплуатации в течение длительного ресурса;
- Разработка методов сокращения затрат и сроков и повышения информативности наземных испытаний КЯЭУ и достоверности получаемых результатов.

Установки с прямым термоэмиссионным преобразованием энергии

Установка «Енисей» разрабатывалась с 1963 года на основе термоэмиссионной системы преобразования тепловой энергии ядерного реактора в электричество с использованием одноэлементных электрогенерирующих каналов (ЭГК), встроенных в активную зону реактора.

С 1974 года на заводе «Двигатель» (г. Таллин) началось производство полномасштабных опытных образцов реакторных блоков, на которых проводились теплофизические, электроэнергетические, прочностные, позднее и ядерные энергетические испытания.

КЯЭУ "Енисей"

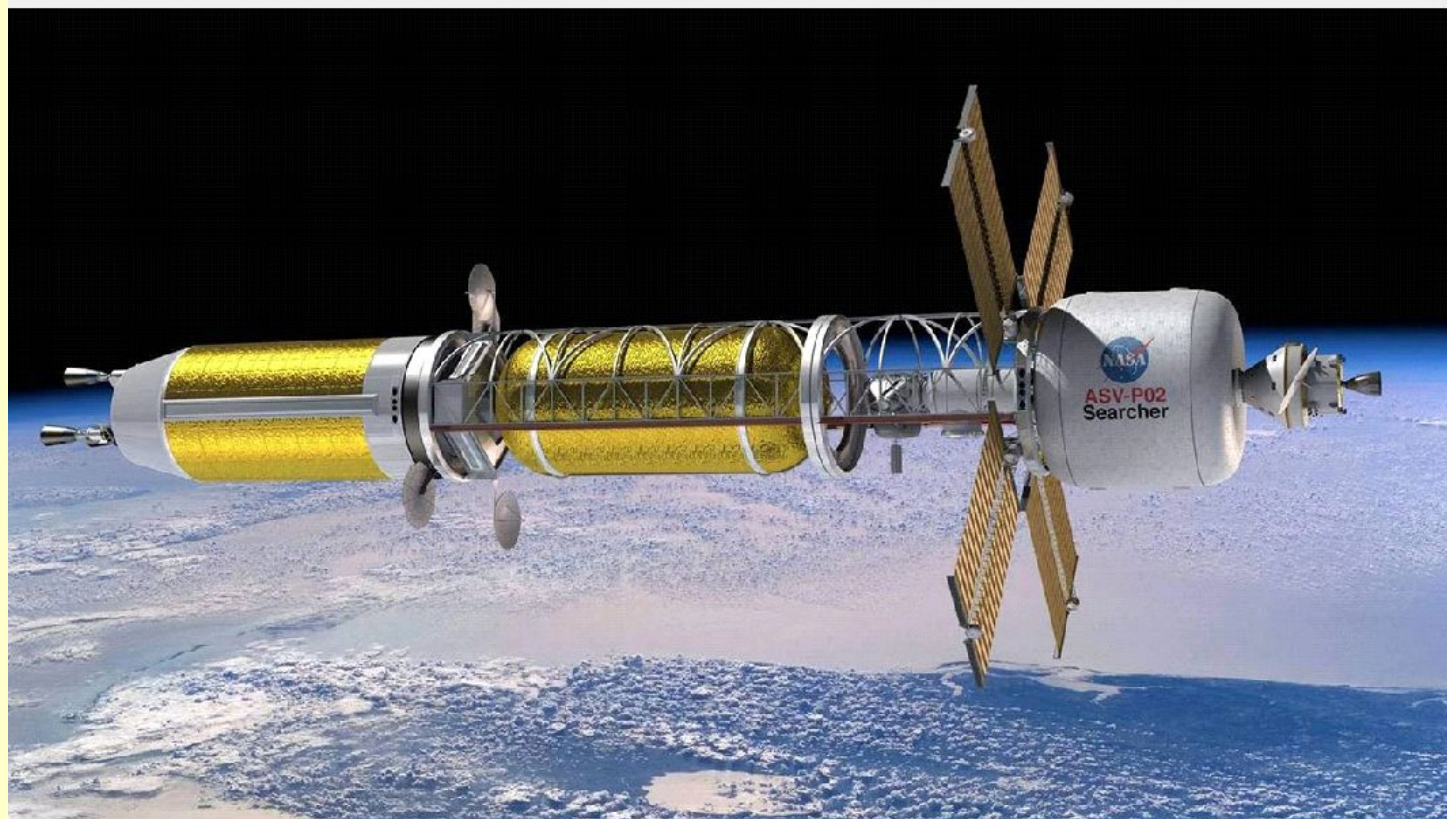


**КЯЭУ второго поколения будут использовать
термоэмиссию в качестве основного способа
преобразования тепловой энергии ядерного
реактора в электричество**

При проектировании энергоустановки на базе термоэмиссионного преобразования можно опираться на имеющийся обширный научно-технический фундамент, созданный в процессе многолетних научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, подтвержденный результатами наземных и летных испытаний ЯЭУ «Тополь» и «Енисей».

Ядерный двигатель для военного космоса

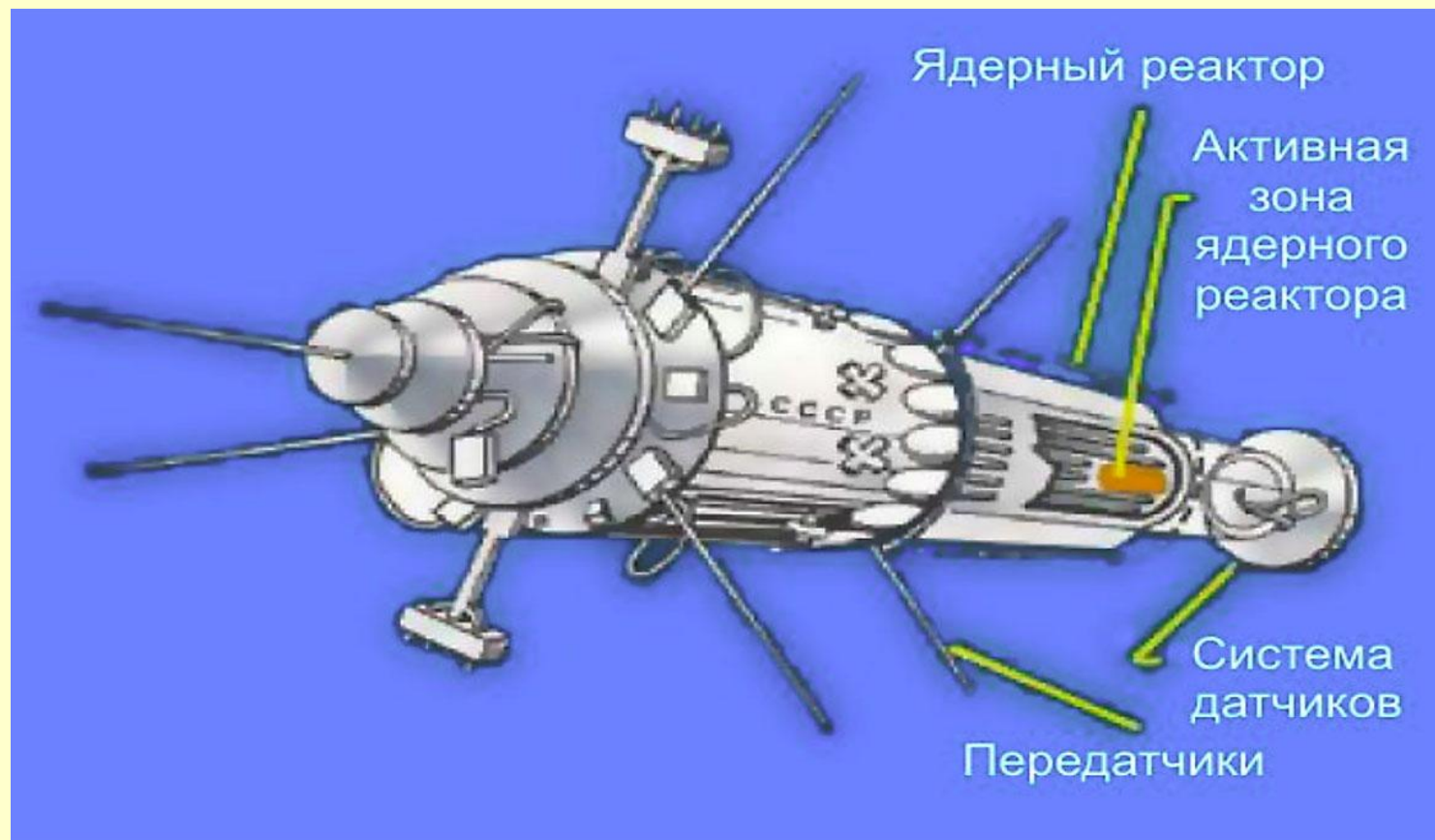
Новые принципы использования ядерных реакторов на космических аппаратах потенциально способны вывести всё человечество на новый этап освоения ближнего и дальнего космоса



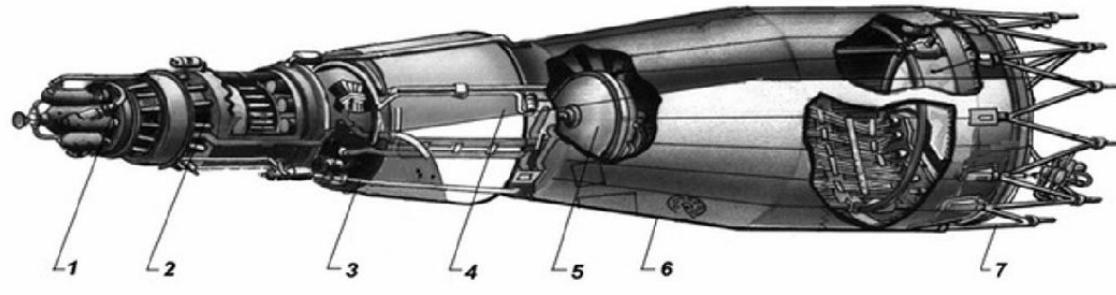
Первоначально применялись радиоизотопные термоэлектрические генераторы (РИТЭГ). Они используют естественный процесс радиоактивного распада радиоизотопов. Но радиоизотопные термоэлектродгенераторы отличаются двумя серьёзными недостатками - низкой мощностью и невысоким КПД. РИТЭГ установлен на марсоходе Curiosity (в переводе на русский - «Любопытство» или «Любознательность»).



Как и американский, отечественный реактор работал на уране-235. Ядерная энергетическая установка монтировалась на космические аппараты под названием «Космос» серии УС-А («Управляемый Спутник-Активный»), запускаемых по программе «Легенда». Это была система предназначенная для глобальной спутниковой морской космической разведки и целеуказания (МКРЦ) силам и средствами ВМФ СССР. В реальном времени она наводила противокорабельные крылатые ракеты на морские цели противника. По мнению президента США Рейгана, система «Легенда» представляла собой большую угрозу для американского флота.



После распада Советского Союза американцы в 1992 г. купили у России технологию создания космической ядерной энергетической установки под названием «Топаз». Кроме того, они приобрели две термоэмиссионные ядерные энергетические установки «Топаз-2» («Енисей»), которые были способны генерировать рекордную в те времена электрическую мощность до 10 кВт.



КЯЭУ «ТОПАЗ»

1 – блок системы подачи пара цезия и приводов органов регулирования; 2 – ТРП; 3 – трубопровод ЖМК; 4 – РЗ; 5 – компенсационный бак ЖМК; 6 – ХИ; 7 – рамная конструкция.

Космическая ядерная энергетическая установка «Топаз».

- в конце 2019 г. Пентагон создал Космические силы, - как средство вооружённой борьбы.
- В основе перспективного американского спутника лежит ядерная тепловая двигательная установка, которая в два раза эффективнее существующих двигателей, работающих на химическом топливе. С её помощью NASA планирует приступить к освоению Луны.
- на Луне находятся значительные запасы трития, который можно применять в качестве топлива в реакторах управляемого термоядерного синтеза. На сегодняшний день добыча трития и его доставка на Землю считаются нереализуемой задачей.

Плюсы и минусы ядерного реактора

Космические аппараты с ядерными двигателями многие годы смогут работать в космосе без необходимости экономить или пополнять топливо. По мнению американских специалистов, космические аппараты с ядерными двигателями следует использовать в космических системах предупреждения о ракетном нападении и в спутниках GPS. Это позволит американским космическим аппаратам легко маневрировать, уклоняясь от противоспутникового оружия или другой опасности.

Реактор вырабатывает тепло, которое нагревает теплоноситель в виде газовой смеси, например гелий-ксеноновой. Теплоноситель расширяется и вращает турбину. С её валом связан электрический генератор и компрессор, поддерживающий давление в замкнутом контуре теплоносителя.

Вырабатываемая генератором электроэнергия направляется для работы плазменного (ионного) двигателя. Процессы, происходящие в ионном двигателе, чем-то напоминают работу электронно-лучевой трубки в старых телевизорах.

В условиях вакуума в газоразрядной камере размещены два типа электродов - аноды и катодный блок. Внутрь подаётся рабочее тело в виде инертного газа, например ксенона. На анод и катод поступает напряжение с большой разницей электрических потенциалов. В результате возникают разряды тока, которые ионизируют рабочее тело. Образовавшиеся при этом ионы в промежутке между эмиссионным и ускоряющим электродом за счёт мощного электромагнитного поля и вакуума быстро разгоняются, толкая космический аппарат в противоположную сторону. По сути, поток заряженных частиц, исходящих из плазменного двигателя, выполняет функцию реактивной струи. Под действием электромагнитного поля ионы могут развивать скорость до 200 км/с, тогда как у химических двигателей этот показатель не превышает 3-4,5 км/с.

Большую проблему представляет избыточное тепло, образующееся в ядерном реакторе. Казалось бы, что при абсолютном нуле в космосе проблемы в охлаждении нет. Но в условиях вакуума нет частиц воздуха, которые нагреваются от горячего тела и тем самым охлаждают его. В вакууме тепло просто нечему передать. Поэтому в реакторе предусмотрен второй контур, из которого избыточное тепло с помощью холодильников-излучателей

Ядерный «Зевс» России

Кроме США интенсивные работы по созданию ядерного ракетного двигателя ведёт Китай. Разработкой занимается Китайская корпорация аэрокосмической науки и техники (China Aerospace Science and Technology Corporation, CASC). Она планирует создать к 2045 г. многоразовый космический корабль, оснащённый ядерным ракетным двигателем.

Роскосмос планирует запустить с космодрома Восточный в 2030 г. космический буксир «Зевс». В США уже говорят, что благодаря большой мощности ядерного реактора на борту военный аналог «Зевса» сможет с помощью электромагнитного импульса выводить из строя космические аппараты, станции и корабли противника или подсвечивать лазерным лучом боевые блоки баллистических и гиперзвуковых ракет. На самом деле Роскосмос планирует, что корабль будет выполнять функцию схожую с паромом. Он будет доставлять грузы с Земной орбиты на орбиту Луны или Марса и обратно, а также обеспечивать связь, ретрансляцию, теле- и радиовещание вокруг Земли. ■