

ЯДЕРНАЯ ИНДУСТРИЯ

Курс лекций

Лекция 16. **ЯДЕРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ДЛЯ ТРАНСПОРТА**

Содержание

1. АТОМНЫЙ ФЛОТ	1
1.1 Атомные подводные лодки, АПЛ	1
1.1.1 Историческая справка	1
1.1.2 Поколения АПЛ	2
1.1.3 Подводные лодки с атомной энергетической установкой с ЖМТ	3
1.1.4 Несерийные подводные лодки	4
1.1.5 Ядерные энергетические установки для АПЛ	4
1.2 Атомные надводные военные корабли	6
1.3 Топливо для реакторов атомного военного флота	7
1.4 Гражданские суда с ЯЭУ	8
2. АВИАЦИЯ	12
2.1 США	12
2.2 СССР	13
3. БОЕВЫЕ РАКЕТЫ НА БАЗЕ ЯРД	20
4. КОСМИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ	20
4.1 Америка	20
4.2 СССР (Россия)	22
4.3 Типы ЯРД космического назначения	23
4.3.1 Ядерный взрывной двигатель	24
4.3.2 Радиоизотопный ЯРД	24
4.3.3 ЯРД с реактором деления.	24

1. Атомный флот

Практически сразу после создания, энергетические ядерные реакторы были модернизированы с целью создания двигателей для атомного флота.

***Атомный флот**, совокупность гражданских судов и военных кораблей различного класса и назначения, имеющих в качестве главного источника энергии ядерные силовые установки.*

***Атомоход**, общее название судов (надводных и подводных) с ядерной силовой установкой.*

1.1 Атомные подводные лодки, АПЛ**1.1.1 Историческая справка**

Рис. 1 Атомные подводные лодки

С 1955 по 1996 год в СССР построено 250 атомных подводных лодок и 5 надводных кораблей (**Фото 1**). Помимо этого, был сконструирован ядерный реактор (класса «Нюрка») для дизельных подводных лодок. К Северному флоту приписано 2/3 всех атомных подводных лодок России, 1/3 приходится на Тихоокеанский флот. На Черноморском и Балтийском флотах АПЛ не базируются. К концу 80-х годов, по общему количеству атомных и дизельных подводных лодок, СССР превзошел подводные флоты всех государств, включая США. По договорам СНВ-1 и СНВ-2 и в результате физического и морального старения, из боевого состава ВМФ России к 1995 выведено из строя 138 атомных подводных лодок. На 2000 в боевом составе Северного флота находились 67 атомных подводных лодок и два атомных крейсера. В состав Тихоокеанского флота входили 42 атомные подводные лодки, один атомный крейсер и один атомный корабль связи.

Советские атомные подводные лодки проектировались в трех основных конструкторских бюро: «Малахит» и «Рубин» (С.-Петербург) и «Лазурит» (Нижний Новгород), а строились на четырех судостроительных заводах: «Северное машиностроительное предприятие» (Северодвинск), Амурский завод (Комсомольск-на-Амуре), «Красное Сормово» (Нижний Новгород), и Ленинградское Адмиралтейское Объединение (Санкт-Петербург). Атомные надводные корабли строились на Балтийском заводе (Санкт-Петербург).

США 17 января 1954 приняли в состав флота первую атомную подводную лодку. Постановление Советского Правительства о строительстве первой атомной подводной лодки было принято 21.12.1952. Научным руководителем разработок был назначен А.П.Александров, главным конструктором по энергетике - Н.А.Доллежалъ. Для АПЛ был выбран водо-водяной реактор, аналогов которому в стране не существовало (работы над реактором такого типа для АЭС начались только в 1955 году). Необходимо было решить ряд новых инженерно-конструкторских задач. В первую очередь - создание энергетического блока атомного корабля, т.е. создание реакторной установки, систем и механизмов, обеспечивающих ее работу. В результате была создана малогабаритная, высоконапряженная и высокоманевренная ЯЭУ, удовлетворяющая требованиям подводной лодки.

Строительство первой советской атомной подводной лодки К-3 («Ленинский Комсомол») пр. 627А (класса «Ноябрь» началось 24.09.1955 в г. Молотовске (сегодня г. Северодвинск). АПЛ была спущена на воду 9.08.1957, первый пуск ядерной энергетической установки К-3 (ВВЭР) был дан 3.07.1958. В этом же году был пущен прототип реактора с жидкометаллическим теплоносителем и началось обучение экипажа.

Принятые на вооружение в США и СССР атомные подводные лодки, оснащенные атомным оружием, могли подойти к берегам противника незамеченными. Это направление развития военной техники способствовало нарастанию гонки вооружения.

1.1.2 Поколения АПЛ

АПЛ первого поколения включали следующие проекты: пр.627А (класса "Ноябрь"), пр.658 (класса "Отель"), пр.659 (класса "Эхо-I") и пр.675 (класса "Эхо-II"). В период с 1955 по 1964 г. было построено 55 атомных подводных лодок первого поколения. Серия АПЛ класса "Ноябрь" насчитывала 13 единиц, класса "Отель" - 8 единиц, класса "Эхо-I" - 5 единиц и класса "Эхо-II" - 29 единиц. АПЛ пр.658 (класса "Отель", К-19) была первой стратегической атомной подводной лодкой, имея на борту 3 баллистические ракеты с ядерными боеголовками. АПЛ класса «Эхо» могли нести 8 крылатых ракет. В 1992 г. выведена из эксплуатации последняя лодка этой серии.

В период с 1964 по 1974 г. СССР построил 34 АПЛ второго поколения пр.667А (класса "Янки"). Каждая АПЛ этой серии могла нести 16 баллистических ракет с дальностью стрельбы - 3000 км. Сегодня почти все АПЛ этого класса выведены из эксплуатации. В 1972 начинается выпуск более совершенных стратегических АПЛ второго поколения пр.667Б («Дельта-И»), имевших на борту 12 более мощных ракет с дальностью стрельбы 9000 км. На АПЛ этой серии было также установлено более совершенное навигационное и гидроакустическое оборудование. С вводом в боевой состав АПЛ этого класса, несущих межконтинентальные ракеты, отпадала необходимость осуществлять патрулирование у берегов США. Запуск ракет можно было произвести, находясь у побережья Кольского полуострова или из под льда Северного ледовитого океана. В дальнейшем были созданы новые АПЛ в рамках этой серии: пр.667БД

(«Дельта-II»), пр.667БДР («Дельта-III») и пр.667БДРМ («Дельта-IV»), оснащенные 16 межконтинентальными ракетами каждая. Дальность стрельбы ракет этого класса позволяла поражать цели на территории США при запуске из пунктов базирования. В 1971-92 построено 43 АПЛ этой серии. Ко второму поколению также относятся АПЛ проектов 670 («Чарли-I-II») и 671 («Виктор-I-II-III»). Всего построено 17 подводных лодок классов «Чарли» и 48 подводных лодок классов «Виктор». АПЛ класса «Чарли» имеют на вооружении крылатые ракеты и предназначены для борьбы с ударными авианосными группировками и надводными кораблями противника. АПЛ класса «Виктор» - многоцелевые ПЛ и предназначены для борьбы с подводными лодками противника. Атомные подводные лодки этих классов были первыми в СССР, оборудованные одним водо-водяным реактором.

Строительство первой серии АПЛ третьего поколения пр.941 (класса "Тайфун") началось в 1977. В состав она вошла в 1981. К 1989 построено 6 АПЛ класса "Тайфун" - самых больших атомных подводных лодок в мире, способных нести 200 ракет с ядерными боеголовками. Идея создания таких мощных атомных подводных лодок заключалась в возможности получения превосходства сил на случай развертывания ядерной войны. На кораблях третьего поколения используется более безопасная и совершенная атомная энергетическая установка, новая система электроники и радиотехнического вооружения, понижается шумность подводных лодок. В 1980 в боевой состав Северного флота входит первая АПЛ пр.949 (класса "Оскар-I"), оснащенная крылатыми ракетами типа "Гранит" для борьбы с авианосными группировками противника. Строительство АПЛ пр.949А (класса "Оскар-II") началось несколькими годами позже. Четыре многоцелевые АПЛ пр.945 (класса "Сиерра") вошли в боевой состав флота в 1984 -1993. Корпус этих АПЛ сделан из титановых сплавов. С 1982 начинается строительство усовершенствованной версии АПЛ класса "Сиерра" - атомных подводных лодок пр.971 (класса «Акула», **Рис. 2**). Эти лодки самые современные среди АПЛ российского ВМФ, имеющие повышенную скрытность за счет увеличения глубины погружения и снижения уровня шумности. Последние АПЛ этого класса классифицируются как "Акула-II" и в длину превосходят АПЛ класса "Акула-I" на 4 метра. В 2000 продолжалось строительство только двух проектов АПЛ третьего поколения - пр.949 и 971 (классов "Оскар" и "Акула").



Фото 2. Многоцелевая лодка проекта 971. Имеет на вооружении торпеды, ракета-торпеды и крылатые ракеты «Гранат» с дальностью стрельбы 3000 км (для поражения береговых целей), которые запускаются из торпедных аппаратов.

В 1993 началось строительство АПЛ четвертого поколения класса «Северодвинск», пр.885 (моноблочная атомная установка типа КПМ с одним водо-водяным реактором, мощность на валу - 43000 л.с., тепловая мощность - 200 МВатт). Спущена на воду в 1995. Уровень шумности атомной подводной лодки этого класса ниже, чем у АПЛ пр.971 класса «Акула» - самой совершенной на сегодня атомной ПЛ в мире. В настоящее время строится 7 АПЛ класса «Северодвинск». В стадии разработки находится пятое поколение атомных подводных лодок, которые будут в два раза меньше атомных ПЛ класса «Тайфун», но смогут нести 20 баллистических ракет.

1.1.3 Подводные лодки с атомной энергетической установкой с ЖМТ

Атомная установка типа БМ-40А (или ОК-550) имеет один реактор с жидко-металлическим теплоносителем (тепловая мощность 155 МВатт). Теплоносителем являлся сплав свинца и висмута (температура кипения 1679°C). Применение жидкого металла в качестве теплоносителя позволяет держать низкое давление в первом контуре, что исключает переопрессовку 1-го контура, тепловой взрыв ядерного реактора и выброс активности наружу. Новой паропроизводящей установке в режимах пуска и расхолаживания требуется меньше электроэнергии, и поэтому емкости аккумуляторной батареи почти на четверть меньше, чем на атомоходах проекта 627А. На новой лодке впервые устанавливаются автономные турбогенераторы, которые повысили надежность и живучесть всей корабельной энергетики в целом. АПЛ пр.645 дала возможность создать серию из

семи скоростных ПЛА проектов 705 и 705К («Альфа»). Эти лодки с титановым корпусом (скорость 41 узел) были полуавтоматами, экипаж в основном состоял из офицерского состава, впервые применялась силовая сеть с частотой 400 Гц, что позволило значительно снизить габариты оборудования при одинаковой энергоёмкости.

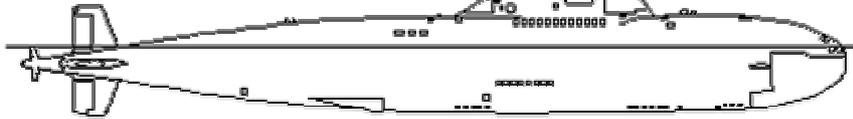


Рис.3. АПЛ серии «Альфа»

АПЛ класса "Альфа" (оружие - ракето-торпеды 82-Р (SS-N-15))

считались скоростными. Скорость, которую могли развить эти лодки, позволяла им уходить от торпед, хотя, в то же время, уровень их шумности был довольно высок.

1.1.4 Несерийные подводные лодки

За всю историю строительства АПЛ было создано 5 экспериментальных кораблей. Это подводные лодки [пр.645](#) (К-27, "Ноябрь" ЖМТ), [пр.661](#) (К-222 (162), "Папа"), [пр.685](#) (К-278, "Комсомолец"), [пр.1910](#) (класса "Юниформ") и [пр.1851](#) (класса "Экс-рей"). Титановая АПЛ [пр.661](#) (К-222) – установила мировой рекорд подводной скорости (44,7 узлов). Затем были построены серийные АПЛ с титановыми прочными корпусами: «Сиерра», «Альфа» и "Комсомолец". Основные преимущества титановых АПЛ заключались в их способности погружаться на глубину, недоступную стальным атомным подводным лодкам, и развивать большую скорость. Подводная лодка "Комсомолец" имела возможность применять оружие (торпеды) на глубине около 1000 метров. Это была самая глубоководная АПЛ в мире, установившая рекорд погружения - 1022 м. Было создано три класса экспериментальных атомных сверхмалых ПЛ - одна [пр.10831](#), одна [пр.1851](#) (класса "Экс-рей"), три [пр.1910](#) (класса "Юниформ"). Все малые АПЛ базируются на Северном флоте и оборудованы одной ядерной установкой типа ВВЭР. Эти АПЛ не несут ядерных боезарядов и используются для исследовательских или разведывательных целей.

1.1.5 Ядерные энергетические установки для АПЛ

В основном на АПЛ установлены модификации атомных установок с реакторами типа ВВЭР. При меньших размерах на ядерных установках АПЛ достигается относительно большая выходная мощность, чем на реакторах АЭС. Обогащение ядерного топлива АЭС по урану-235 не превышает 4%, в то время как уровень обогащения ^{235}U в топливе АПЛ может достигать 90%. Такой высокий уровень обогащения топлива АПЛ позволяет производить его замену гораздо реже, чем это делается на АЭС. Тепловая мощность реакторов российских АПЛ варьируется от 10 МВт на небольших ядерных установках, используемых на АПЛ [пр.1910](#) (класса «Юниформ») до 200 МВт в реакторах, установленных на новой АПЛ [пр.885](#) (класса «Северодвинск»). Тепловая мощность ядерных установок атомного крейсера [пр.1144](#) (класса «Киров») составляет 300 МВт.

Как и АПЛ, ЯЭУ делятся на четыре поколения. Проектирование ЯЭУ третьего поколения осуществлялось с начала 70-х годов. Этот период в развитии ядерной энергетики характеризуется формированием нового подхода к атомным установкам, как к объекту повышенной опасности. Была разработана концепция по созданию систем безопасности, включая системы аварийного расхолаживания и локализации аварии. Эти системы рассчитывались на максимальную проектную аварию, в качестве которой принимался мгновенный разрыв трубопровода теплоносителя на участке максимального диаметра. Была применена блочная схема компоновки, которая обеспечила повышенную безопасность. Схема позволила иметь режим естественной циркуляции по первому контуру на высоких уровнях мощности реактора, что важно для организации теплоносителя с активной зоны при обесточении корабля. ЯЭУ оборудованы системой безбатарейного расхолаживания, которая автоматически вводится в работу при исчезновении электропитания. Импульсная пусковая аппаратура контролирует состояние реактора на любом уровне мощности, в том числе и в подкритическом состоянии. При аварии происходит полное «глушение» реактора, даже при опрокидывании корабля. Блочная компоновка ЯЭУ уменьшила габариты, увеличив при этом ее мощность. Главными проблемами на ЯЭУ третьего поколения с точки зрения

безопасности являются проблемы надежности основного оборудования: активных зон, блоков очистки и расхолаживания. Проблемы с надежностью основного оборудования связаны с высокой цикличностью процессов, происходящих в атомной установке при ее эксплуатации.

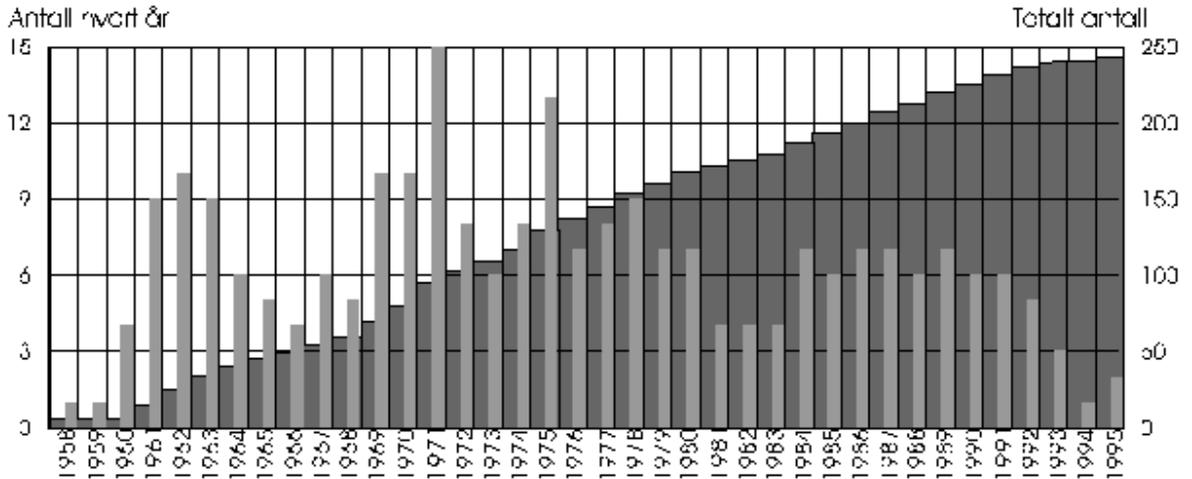


Рис.4 АПЛ, построенные в СССР/России в период с 1958-1995 г.г. (показана интенсивность строительства (дифференциальная кривая) и общее число АПЛ, введенных в строй к данному году)

Атомная установка четвертого поколения представляет собой моноблок (или интегральную схему компоновки). Очевидным преимуществом такой компоновки является локализация теплоносителя первого контура в одном объеме и отсутствие патрубков и трубопроводов большого диаметра. Эта установка создавалась с учетом всех современных требований ядерной безопасности. В связи с тем, что затруднен доступ к оборудованию, размещенному в реакторе, подобная схема компоновки предполагает использование высоконадежного оборудования. В особую категорию атомных установок следует выделить атомные установки с жидкометаллическим теплоносителем (ЯЭУ ЖМТ). На первой из них К-27 произошла авария. Причиной ее было засорение технологических каналов продуктами окисления сплава, в результате чего произошел пережог активной зоны. Шесть кораблей этой серии «Альфа» (Проект No. 705, 705К (Лира)) эксплуатировались в течение 10 лет.

Главным достоинством ядерного реактора на промежуточных нейтронах с теплоносителем свинец-висмут является его динамичность. Основная силовая сеть создана на частоте 400 Гц, что позволило вдвое сократить вес и объем оборудования, но эксплуатация этого оборудования усложнилась. Освоение кораблей с ЯЭУ на ЖМТ было трудным. Существовала опасность затвердевания сплава, что привело бы к выводу из строя атомной установки. В Западной Лице, где базировались корабли класса «Альфа», был создан береговой комплекс, включающий котельную для подачи пара на корабли и поставленные к пирсам плавказарма и эсминец, которые давали пар от своих котлов. Однако, в связи с низкой надежностью берегового комплекса подводные лодки «грелись» от своего тепла, т.е. ЯР работали на минимально контролируемом уровне мощности. Это приводило к быстрому износу реакторов и необходимости постоянного присутствия экипажа на борту лодки. Сложность эксплуатации создавала еще и высокая автоматизация этих кораблей. Все отсеки (за исключением двух) были необитаемы. Операции по управлению системами и оборудованием выполнялись с пультов, размещенных в центральном посту. Из-за этих трудностей все АПЛ этого класса к концу 80-х г.г. были выведены из эксплуатации.

Одним из главных недостатков АПЛ с жидким металлическим теплоносителем явилось использование сплава «свинец-висмут» в первом контуре реакторной установки. При реакции захвата нейтрона висмутом идет наработка полония-210. На конец кампании активность полония-210 в теплоносителе первого контура составляла 28,8 Ки/л. Высокая активность и проникаемость ^{210}Po (α - излучатель) существенно ухудшала радиационную обстановку при эксплуатации реакторной установки и производстве работ по обращению с отработанным ядерным топливом.

Несмотря на то, что на подводных лодках с ЯР на ЖМТ имели место две ядерные аварии, эти реакторные установки более безопасными, чем ЯЭУ с водой под давлением (ВВЭР).

Замечание. Безопасность определяется следующими свойствами реакторов на ЖМТ: высокой температурой кипения теплоносителя (1679 °С) при низком давлении в первом контуре, что исключает переопрессовку 1-го контура, тепловой взрыв ядерного реактора и выброс активности наружу; быстрым затвердеванием сплава при разгерметизации (температура плавления сплава около 125 °С), благодаря чему исключается возможность тяжелой аварии с потерей теплоносителя; небольшой долгоживущей наведенной альфа-активностью собственно теплоносителя; отсутствием выхода аэрозолей ^{210}Po , однако при этом существует нейтронное излучение радиоактивного ^{210}Po (период полураспада - 138 суток); способностью ЖМТ при повреждении оболочек ТВЭЛов и разгерметизации 1-го контура удерживать значительную активность радиоактивного йода, представляющего основную радиационную опасность для обслуживающего персонала; небольшим запасом реактивности, исключающим в энергетических режимах неконтролируемый разгон ЯР на мгновенных нейтронах, а также способностью ЯР самопроизвольно уменьшать мощность в аварийных ситуациях; градиент давления между контурами ЭУ направлен от второго контура к первому, что позволяет предотвратить выход радиоактивного теплоносителя за пределы контура.



ЯЭУ с ЖМТ по-прежнему считаются перспективными. В настоящий момент конструкторы ЯЭУ решили проблему "замораживания" и "размораживания" сплава в установке, однако корабли с ЖМТ установкой в настоящее время не строятся, а в эксплуатации остался один корабль (К-123).

Рис.5. Атомный надводный крейсер класса «Орлан».

1.2 Атомные надводные военные корабли

За период с 1974 по 1995 годы на Балтийском заводе в Санкт-Петербурге было построено 4 атомных крейсера («Адмирал Нахимов», «Адмирал Лазарев», «Адмирал Ушаков», «Петр Великий») и один атомный корабль связи «Урал».

Табл. 1: Количество судов с ЯЭУ, построенных в СССР/России в период 1958 - 1995.

Проект	Класс НАТО	Построено	ЯЭУ	Всего реакторов в классе	В боевом составе	Реакторы в эксплуатации
1-е поколение						
627 А	"Ноябрь"	13	2 (ВВЭР)	26	0	0
658	"Огель"	8	2 (ВВЭР)	16	0	0
659	"Эхо-I"	5	2 (ВВЭР)	10	0	0
675	"Эхо-II"	29	2 (ВВЭР)	58	0	0
2-е поколение						
667 А	"Янки"	34	2 (ВВЭР)	68	0	0
667 Б-БДРМ	"Дельта" I- II- III- IV	43	2 (ВВЭР)	86	18	36
670	"Чарли" I- II	17	1 (ВВЭР)	17	0	0
671 /РТ/РТМ	"Виктор" I- II- III	48	2 (ВВЭР)	96	18	36
3-е поколение						
941	"Тайфун"	6	2 (ВВЭР)	12	6	12
949 /А/	"Оскар" I- II	12	2 (ВВЭР)	24	8	16
945	"Сиерра"	4	1 (ВВЭР)	4	4	4
971	"Акула"	12	1 (ВВЭР)	12	5	5
ЖМТ						
645	ЖМТ	1	2 (ЖМТ)	2	0	0
705	"Альфа"	7	1 (ЖМТ)	7	1	1

Опытные ПЛ						
661	"Папа"	1	2 (ВВЭР)	2	0	0
685	"Майк"	1	1 (ВВЭР)	1	0	0
Сверхмалые ПЛ						
10831	10831	1	1 (ВВЭР)	1	1	1
1851	"Экс-рей"	1	1 (ВВЭР)	1	1	1
1910	"Юни-форм"	3	1 (ВВЭР)	3	3	3
Надводные корабли						
1144	"Киров"	4	2 (ВВЭР)	8	2 (3)	4 (6)
1941	"Урал"	1	2 (ВВЭР)	2	0	0
Всего:		247		456	67	119

Атомная установка для надводных кораблей КН-3 (активная зона типа ВМ-16) создавалась на опыте строительства и эксплуатации ЯЭУ ледоколов (Рис.6) По своей конструкции она практически ничем не отличается от атомной установки типа ОК-900 ледоколов класса «Россия». Недостатки в конструкции этих установок с точки зрения безопасности такие же, как и для АПЛ третьего поколения.

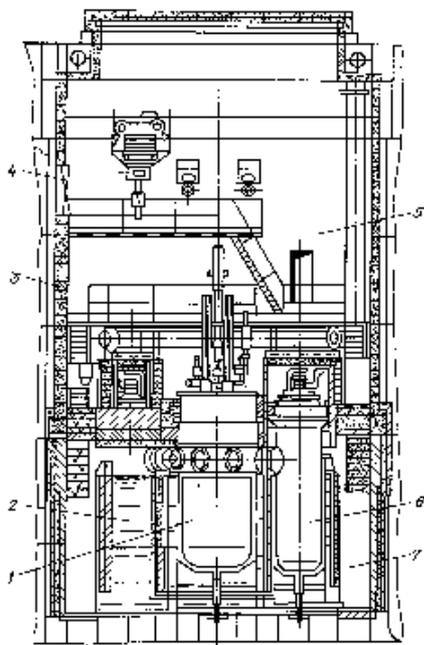


Рис. 6 Ядерная установка атомного ледокола «Арктика» аналогичная ЯЭУ атомных крейсеров 1: реактор; 2: бак защиты; 3: защитная оболочка; 4: аварийный выход; 5: аппаратное помещение; 6: парогенератор; 7: реакторное помещение.

1.3 Топливо для реакторов атомного военного флота

Топливные сборки для атомных подводных лодок с водо-водяными реакторами изготавливались на машиностроительном заводе в г.Электросталь. ТВС для АПЛ класса "Альфа" и единственной в своем роде АПЛ класса "Ноябрь" (К-27), в реакторах которых в качестве теплоносителя использовался жидкий металл, производила Ульяновская металлургическая фабрика в г.Усть-Каменогорске. Активная зона реактора российской АПЛ состоит из 248-252 ядерныхборок в зависимости от типа реактора. Большинство российских АПЛ имеют два реактора. Каждая ядерная сборка состоит из нескольких десятков топливных элементов. Оболочки топливныхборок изготавливаются из стали или циркония, хотя процент циркониевых топливныхборок небольшой.



Фото 7. Первый в мире атомный ледокол «Ленин»

Обогащение топлива водо-водяных реакторов по урану-235 составляет 21% для лодок первого и второго поколений и 43-45% для АПЛ третьего поколения. Некоторые типы водо-водяных реакторов имеют большее обогащение. К примеру, надводное судно связи пр.1941 (класса "Капуста"), базирующееся на Тихоокеанском

флоте, имеет обогащение топлива по урану-235 до 55-90%. Обогащение топлива в реакторах с жидко-металлическим теплоносителем (ЖМТ) 90%. Активные зоны АПЛ третьего поколения состоят из топливных сборок с разным уровнем обогащения. Обогащение ядерных сборок в центре активной зоны лодок этого поколения составляет 21% по урану-235, обогащение тех, что находятся во внешней части зоны, доходит до 45%. (Американские реакторы для подводных лодок работают на 97,3 % обогащенном уране -235).

Количество урана-235 в активных зонах АПЛ третьего поколения составляет 115 кг, второго поколения - 70 кг (при суммарном количестве урана - 350 кг). Активная зона АПЛ первого поколения содержала 50 кг урана-235 (при суммарном количестве урана - 250 кг).



Фото 8. «Таймыр» - атомный ледокол с малой осадкой

1.4 Гражданские суда с ЯЭУ

В России построено десять гражданских судов с ядерными силовыми установками. Девять из них - атомные ледоколы, и один - контейнеровоз (лихтеровоз). Это - самый большой флот гражданских атомоходов в мире. Весь флот принадлежит Мурманскому Пароходству.



Рис.9. Атомные ледоколы «Арктика» и



«Россия»



Рис. 10

Самый большой в мире атомный ледокол «Ямал»

Атомные ледоколы были созданы для облегчения перевозки грузов вдоль северного побережья Сибири, в водах, закрытых льдами,

мешающими плаванию почти весь год. Зимой толщина льда по Северному морскому пути изменяется от 1,2 до 2 метров. Средняя толщина льда в центральной части Северного ледовитого океана 2,5 м. Атомные ледоколы намного мощнее своих дизельных партнеров. Они способны

форсировать этот лед со скоростью 10 узлов. В незамерзающих водах максимальная скорость АЛ - 21 узел. Комфорт на борту атомного ледокола достаточно высок. Он располагает плавательным бассейном, сауной, кино- и гимнастическими залами. В ресторане имеется бар и танцплощадка. Экипаж «Вайгача» и «Таймыра» 120 человек, а ледоколов типа «Арктика» 200.

Ледокол «Ленин» - первый в мире гражданский атомоход (спуск на воду 1957, начало работы 1959, конец эксплуатации 1989, водоизмещение: 17810 т., тип главной установки: атомная турбоэлектрическая, мощность главной установки: 44000 л.с., максимальная скорость хода на чистой воде: 19,6 уз). Ледокол продемонстрировал высокую проходимость и маневренность во льдах, способствовал успешной проводке транспортных судов на ответственных участках трассы Северного морского пути.

Затем были построены ледоколы типа «Арктика» («Арктика» 1975, водоизмещение: 20905 т. Мощность главной установки: 75000 л.с.; «Сибирь» 1977; «Россия» 1985, водоизмещение 23 тыс. тонн; «Советский Союз» 1990, «Ямал» 1993 и «Урал» 1994), речные (с малой осадкой) ледоколы («Таймыр» 1989, водоизмещение 20000 т., мощность 50000 л.с., ледопроемимость 1,77 м; «Вайгач» 1990) и контейнеровоз-лихтеровоз «Севморпуть» 1988). «Ямал» – самый мощный ледокол в мире (Водоизмещение: 20000 т, мощность 50000 л.с). Он обладает двойным корпусом и специальным ледокольным дизайном. Проходу через льды помогает пневмоомывающая система, подающая через специальные форсунки под лед нагретую воду, а также полимерное покрытие и возможность быстрого перемещения балластной воды. Лед может ломаться как при движении вперед, так и назад. Судно движется за счет вращения трех грибных винтов, каждый из которых снабжен семитонными лопастями. Два ядерных реактора, обеспечивающие пар для движения, заключены в 160 тонную оболочку из стали, высокоплотного бетона и воды. Опреснители производят пять тон чистой воды в час.

Все атомные ледоколы типа «Арктика» построены на Адмиралтейской верфи (С.-Петербург), «Вайгач» и «Таймыр» - на верфи Финляндии, а «Севморпуть» - в Керчи. Атомные реакторы и турбогенераторы ледоколов «Арктика» и «Сибирь» были впоследствии модернизированы, поскольку не удовлетворяли современным требованиям безопасности. Сейчас старые ледоколы постепенно выводятся из эксплуатации.

Ледоколы типа «Арктика» проводят через ледовые поля сухогрузы и другие корабли на Северном морском пути. «Вайгач» и «Таймыр» проводят суда по мелководью, обычно по р. Енисей лесовозы от портов Диксон и Игарка, а также сухогрузы с рудой и металлом от порта Дудинка (Норильск). Эти ледоколы используются и как пожарные катера. Атомные ледоколы обеспечили ряд научных экспедиций в Арктическом бассейне. Так, «Арктика» - первый надводный корабль в мире, который смог достичь Северного Полюса (17.08.1977). Начиная с 1989, атомные ледоколы стали применять для туристических целей, в основном для доставки туристов на Северный Полюс. Российские атомные ледоколы изредка перемещали канадские нефтяные платформы.

«Севморпуть», контейнеровоз с ядерной силовой установкой, снабжен прочным корпусом. Он способен передвигаться самостоятельно по сплошному льду толщиной до одного метра. Длина судна 260 метров, водоизмещение 61000 тонн. «Севморпуть» вмещает 74 лихтера, или 1336 контейнера. Корабль в используется для транспортировки лихтеров и контейнеров от Мурманска до городов на северном побережье Сибири. Подходы к большинству Сибирских прибрежных городов очень мелководны, поэтому «Севморпуть» становится на рейде, спускает баржи на воду и их затем буксируют к берегу небольшие суда.

Атомный реактор на ледоколе (КЛТ-40) – ВВЭР, слегка модернизированный вариант первых реакторов для атомных подводных лодок. Главное различие между ледокольными реакторами и реакторами для подводных лодок - их размер. Оболочка реактора атомохода «Ленин» имела 1.5 м высоты и 1 м в диаметре. Активная зона реактора содержит от 241 до 274 топливных сборок. Топливо – обогащенный до 30-40% уран -235, (гражданские ядерные установки используют 3-4% уран -325). ТВС заменяют через три - четыре года нормальной эксплуатации. Для предотвращения

кипения, вода в корпусе реактора находится под высоким давлением. Горячая вода (300-400°С) от реактора передает тепло другому замкнутому контуру, где образовавшийся пар в свою очередь передает энергию турбине, вращающей винты. Для каждой из активных зон реактора предусмотрены четыре парогенератора, которые снабжают турбины паром. Третья охлаждающая система использует морскую воду, которая конденсирует и охлаждает пар. Сконденсированная вода вновь нагревается водой в корпусе реактора. Система охлаждения ледокольных реакторов рассчитана на Арктическую морскую воду низкой температуры. Ледоколы «Вайгач» и «Таймыр» оснащены одним реактором. Активная зона реактора имеет 274 ТВС и передает мощность к винтам порядка 50000 л.с. «Сибирь», «Арктика», «Россия», «Советский Союз» и «Урал» все имеют по два атомных реактора (активная зона реактора вмещает 241 ТВС). Мощность, передаваемая на винты, 75000 л.с. (135 МВт).

Реактор контейнеровоза «Севморпуть» передает винтам мощность в 44000 л.с. Реактор подобен реакторам «Таймыра» и «Вайгача» и вмещает максимум 274 ТВС. Система охлаждения реактора несколько отличается системы других атомоходов. Она не требует морской воды с низкой температурой. По этой причине «Севморпуть» способен плавать и в более теплых морях.

Сейчас (2000) Мурманское пароходство располагает 15 атомными реакторами, размещенными на гражданских судах. Судовые энергетические установки считаются самыми надежными. Кроме того, они транспортабельны. В случае необходимости их можно установить на плавучем сооружении, переместить в другой район.

Сейчас разработан подводный нефтеналивной танкер на базе ракетной подводной лодки. Расчетная скорость танкера – 33.3 км/ч против 5.5 км/ч у дизельного ледокола. Увеличивается и срок навигации, который для надводных судов не превышает 20-30 дней. Проект освоения месторождений нефти и газа подо льдами Арктики предусматривает применение атомных подлодок в качестве носителей технологических модулей для бурения скважин, энергоснабжения, хранения углеводородного сырья, монтажа оборудования, грузовых перевозок.

В России с 1959 года на атомных судах эксплуатировались 5 типов атомных паро-производительных установок: ОК-150, ОК-900, ОК-900А, КЛТ-40 и КЛТ-40М.

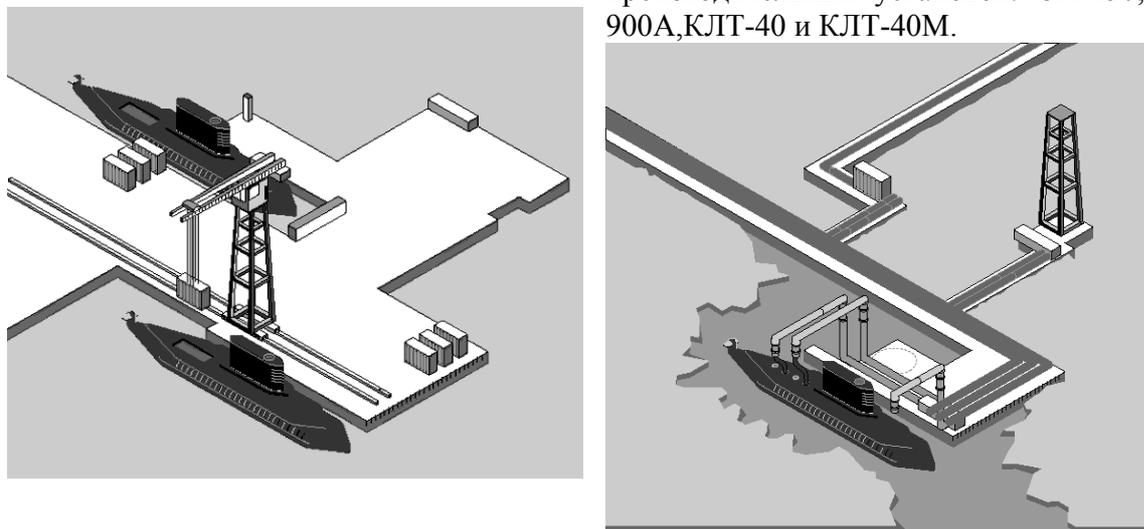


Рис.11 Схема использования АПЛ в качестве танкера (транспорт нефти и газа)

Каждая энергетическая установка состоит из отдельных блоков, в каждом блоке находятся: реактор водо-водяного типа, четыре циркуляционных насоса и четыре парогенератора, компенсатор объема, ионообменный фильтр с холодильником и другое оборудование. Реактор, насосы и парогенераторы имеют отдельные корпуса и соединены друг с другом короткими патрубками типа “труба в трубе”. Все оборудование расположено вертикально в кессонах бака железобетонной защиты и закрыто малогабаритными блоками защиты, что обеспечивает легкую доступность при ремонтных работах.

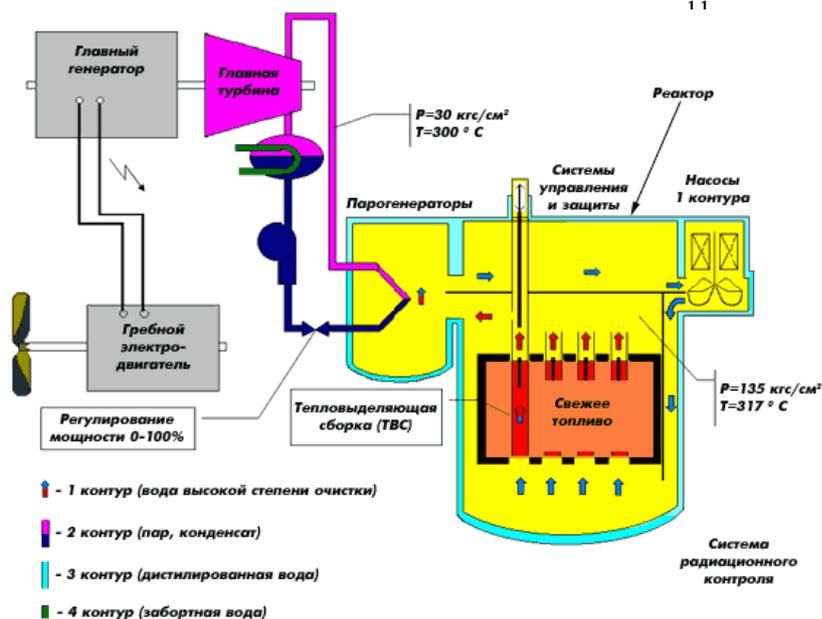


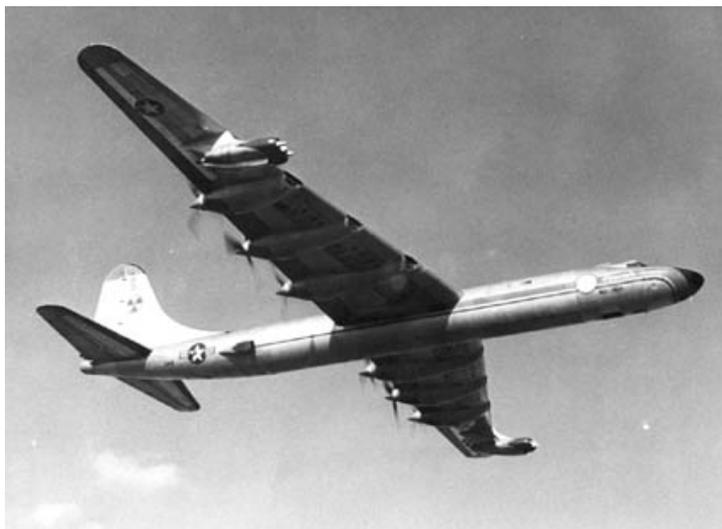
Рис. 12 Схема судовой реакторной установки

Реактор состоит из активной зоны и отражателя. Реактор водородного типа - вода в нем является и замедлителем быстрых нейтронов и охлаждающей и теплообменной средой. Активная зона содержит ядерное топливо в защитном покрытии (тепловыделяющие элементы - ТВЭЛы) и замедлитель. ТВЭЛы, имеющие вид тонких стержней, собраны в пучки и заключены в чехлы. Такие конструкции называются

тепловыделяющими сборками ТВС. Активная зона реактора представляет собой совокупность активных частей свежих тепловыделяющихборок (СТВС), которые в свою очередь состоят из тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ). В реактор помещаются 241 СТВС. Ресурс современной активной зоны (2,1 - 2,3 млн. МВт час.) обеспечивает энергетические потребности судна с ЯЭУ в течение 5-6 лет. После того, как энергоресурс активной зоны исчерпан, проводится перезарядка реактора. Корпус реактора с эллиптическим днищем изготовлен из низколегированной теплостойкой стали с антикоррозийной наплавкой на внутренних поверхностях. Тепловая схема паропроизводящей установки атомного судна состоит из 4-х контуров. Через активную зону реактора прокачивается теплоноситель I контура (вода высокой степени очистки). Вода нагревается до 317°C, но не превращается в пар, поскольку находится под давлением. Из реактора теплоноситель I контура поступает в парогенератор, благодаря чему вода, протекающая по его трубам, превращается в перегретый пар. Далее теплоноситель I контура циркуляционным насосом снова подается в реактор. Из парогенератора перегретый пар (теплоноситель II контура) поступает на главные турбины. Параметры пара перед турбиной: давление - 30 кгс/см² (2,9 Мпа), температура - 300°C. Затем пар конденсируется и далее вода проходит систему ионообменной очистки и снова поступает в парогенератор. III контур предназначен для охлаждения оборудования ЯЭУ, в качестве теплоносителя используется вода высокой чистоты (дистиллят). Теплоноситель III контура имеет незначительную радиоактивность. IV контур служит для охлаждения пара в системе II контура, в качестве теплоносителя используется морская вода.

АППУ выполнена и размещена на судне таким образом, чтобы обеспечить защиту экипажа и населения от облучения, а окружающую среду - от загрязнения радиоактивными веществами в пределах допустимых безопасных норм как при нормальной эксплуатации, так и при авариях установки и судна. С этой целью на возможных путях выхода радиоактивных веществ созданы четыре защитных барьера между ядерным топливом и окружающей средой: I. первый - оболочки топливных элементов активной зоны реактора; II. второй - прочные стенки оборудования и трубопроводов первого контура; III. третий - защитная оболочка; IV. четвертый - защитное ограждение, границами которого являются продольные и поперечные переборки, второе дно и настил верхней палубы в районе реакторного отсека. Безопасность АППУ обеспечена устройствами и системами нормальной эксплуатации и системами безопасности, предназначенными для надежного выключения реактора, отвода тепла от активной зоны и ограничения последствий возможных аварий.

2. Авиация



В России и США предпринимались неоднократные попытки создания самолетов с двигателями на базе ядерных энергетических установок. Это сулило беспредельную дальность полёта. Однако в чистом виде этого сделать не удалось.

2.1 США

Рис.13 Бомбардировщик В-36 (США) с действующим атомным реактором на борту

В 1941 в январском номере американского журнала «Популярная механика» появилась статья доктора Р.Лангера об использовании урана-235 в качестве топлива для транспортных средств. Описывавшаяся в статье конструкция

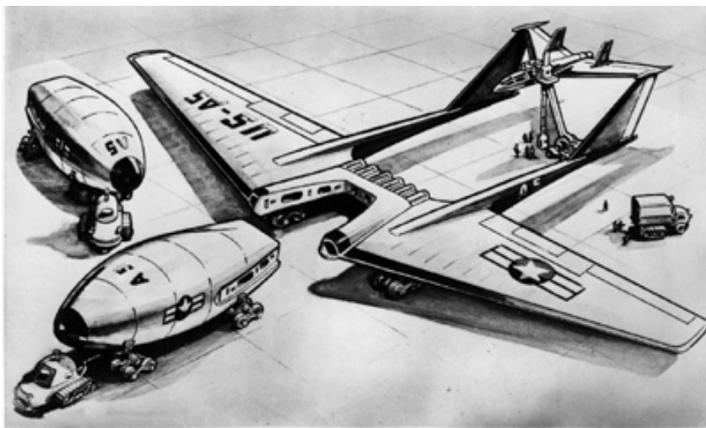
самолета - летающего крыла с атомной силовой установкой тогда была воспринята читателями и многими специалистами как научная фантастика. Однако уже через год Энрико Ферми, один из создателей ядерной физики, обсуждал со своими коллегами по ядерному проекту «Манхэттен» практические проблемы, связанные с использованием атомной энергии для осуществления полета самолета.

В конце 50-х ВВС и Министерством энергетики США была развернута программа «ПЛУТО/ТОРИ» (PLUTO/TORY), нацеленная на создание ядерного прямоточного воздушно-реактивного двигателя для самолета-носителя больших ракет с ядерными боеголовками. В начале 60-х годов программа была свернута ввиду появления компактных конструкций ракет, не требующих создания специального самолета-носителя. Рассматривалось также создание боевых ракет с ядерным ракетным двигателем, однако достигнутое сокращение размеров головных частей с ядерным зарядом сделало возможным использование для этих целей ракетных двигателей системы «Атлас». Всё же США был испытан бомбардировщик с атомным реактором на борту. Переоборудованный бомбардировщик NB-36H (**Рис.14**), несущий действующий реактор был построен для изучения перспектив создания самолета с ядерной энергетической установкой. Самолет с ядерным двигателем никогда и не поднимался в воздух, но ВВС США переделали стандартный бомбардировщик В-36, поместив в него действующий трехмегаваттный реактор с воздушным охлаждением. В задней части бомбоотсека летающей лаборатории разместили испытываемый реактор мощностью 1 МВт диаметром 1,2 м и весом 16 т, работавший на быстрых нейтронах. В качестве ядерного топлива использовалась двуокись урана. Реактор включался в полете и охлаждался атмосферным воздухом, поступающим за счет скоростного напора через специально сделанные в борту самолета воздухозаборники. Нагретый воздух через выхлопные патрубки выбрасывался наружу. Защитная капсула весом 12 т с кабиной экипажа располагалась в носовой части фюзеляжа. Стенки капсулы изготовили из свинца и резины, а остекление кабины - из свинцового стекла толщиной 25-30 см. Сзади кабины экипажа находился защитный экран из стали и свинца диаметром 2 м и толщиной 10 см. Взлет и посадка самолёта осуществлялись обычными двигателями, а полет поддерживался за счет энергии, снимаемой с атомного реактора. Во время полета за работой реактора велось наблюдение из кабины при помощи внутренней телевизионной сети. После полета реактор снимался и хранился в подземном боксе испытательного полигона в штате Техас.

Самолет совершил в 1955-57 47 полетов, что позволило оценить эксплуатационные проблемы.

Фирма «Пратт-Уитни» работала над ядерной силовой установкой закрытого цикла. Существенным достоинством этой схемы являлось отсутствие выбросов радиоактивных продуктов из двигателей. Это достигалось за счет использования дополнительного замкнутого

водяного контура, снимающего тепло с реактора. В первичном контуре охлаждения реактора имелась паровая турбина мощностью 49000 л.с., вращавшая вентилятор диаметром 3,05 м, установленный во вторичном открытом контуре. Атмосферный воздух, нагнетаемый вентилятором, попадал в конденсатор турбины, нагревался там и выходил через реактивное сопло двигателя.



Одна из идей для ядерного самолета включала отсоединяемый реакторный модуль, заменяемый при необходимости. При такой компоновке самолета, пилоты помещались в хвостовой секции, которая могла бы отделяться в экстренных случаях (Рис.14).

Рис.14 Вариант конструкции самолета с ядерным двигателем.

Научно-исследовательский центр ВВС США AFRL (US Air Force Research Laboratory) финансирует сейчас создание

по крайней мере двух версий самолетов-шпионов с ядерным двигателем на базе тяжелых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). На проходившей в феврале 2003 Конференции аэрокосмических технологий ученые представили результаты этой разработки, обещающие за счет ядерного двигателя продлить срок полета БПЛА с нескольких часов до многих месяцев.

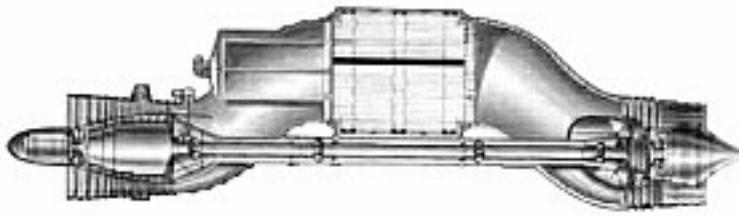
В последнее время (2004) ученые США исследуют возможность создания беспилотного разведывательного самолета, оснащенного атомным двигателем. Теперь авиаторам вместо традиционного реактора ядерного деления предложен существенной иной тип энергогенератора под названием квантовый нуклеонный реактор. Американские ученые предлагают вместо традиционного ядерного реактора, использующего реакцию деления урана, применять в летательном аппарате квантовый ядерный реактор. Его принцип действия основан на облучении рентгеновскими лучами радиоактивного изотопа гафния-178.

Здесь энергия получается за счет использования рентгеновского излучения, которое стимулирует ядра радиоактивного гафния-178 (период полураспада 31 год) к переходу на более низкие энергетические уровни и высвобождению энергии в форме гамма-излучения. (Показано, что рентгеновским облучением гафния можно высвобождать энергии в 60 раз больше, нежели затрачено). В самолете-шпионе на ядерном ходу тяга будет создаваться за счет использования этой энергии для формирования реактивной струи раскаленного воздуха. Имея на борту ядерный источник энергии, такой БЛА сможет находиться в воздухе месяцами, не завися от смены дня и ночи и от погоды.

2.2 СССР

В СССР идея создания ядерного двигателя для самолётов впервые обсуждалась 24.03.1947 на Научно-техническом совете ПГУ. В июне 1952 Александров докладывал Курчатову: «...Наши знания в области атомных реакторов позволяют поставить вопрос о создании в ближайшие годы двигателей на атомной энергии, применяемых для тяжелых самолетов...».

В начале 60-х ОКБ-23 В.М.Мясищева было поручено выполнить предварительный проект сверхзвукового бомбардировщика «со специальными двигателями главного конструктора А.М.Люлька». В ОКБ тема получила индекс «60», ведущим конструктором по ней назначили Ю.Н.Труфанова. Поскольку в самых общих чертах решение задачи виделось в простом оснащении М-50 двигателями на ядерной энергии, причем работающими по открытому циклу (из соображений простоты), то считалось, что М-60 станет первым в СССР атомным самолетом. Однако уже к середине 1956 выяснилось, что так просто поставленную задачу не решить.



Оказалось, что машина с новой СУ обладает целым рядом специфических особенностей, с которыми авиаконструкторы никогда ранее не сталкивались.

Рис.15 Атомный ТРД схемы "коромысло"

Первой проблемой стала защита людей от радиоактивного излучения. Какой она должна быть? Сколько должна весить? Как обеспечить нормальное функционирование экипажа, заключенного в непроницаемую толстостенную капсулу, в т.ч. обзор с рабочих мест и аварийное покидание? Вторая проблема – резкое ухудшение свойств привычных конструкционных материалов, вызванное мощными потоками радиации и тепла, исходящими от реактора. Отсюда - необходимость создавать новые материалы. Третья - необходимость разработки совершенно новой технологии эксплуатации атомных самолетов и постройки соответствующих авиабаз с многочисленными подземными сооружениями. Ведь оказалось, что после остановки двигателя открытого цикла ни один человек к нему не сможет подойти еще 2-3 месяца! А значит, есть необходимость в дистанционном наземном обслуживании самолета и двигателя. Ну и, конечно, проблемы безопасности - в самом широком понимании, особенно в случае аварии такого самолета.

Осознание проблем заставило отказаться от первоначальной идеи использовать планер М-50. Конструкторы начали поиск новой компоновки. Основным критерием выбора расположения атомной силовой установки на самолете было признано максимальное ее удаление от экипажа. Был разработан эскизный проект М-60, на котором четыре атомных ТРД располагались в хвостовой части фюзеляжа попарно в «два этажа», образуя единый ядерный отсек. Самолет имел схему среднеплана с тонким свободонесущим трапециевидным крылом и таким же горизонтальным оперением, расположенным на вершине киля. Ракетное и бомбовое вооружение планировалось размещать на внутренней подвеске. Длина самолета 66 м, взлетная масса - 250 т, крейсерская скорость полета – 3000 км/ч на высоте 18000-20000 м.

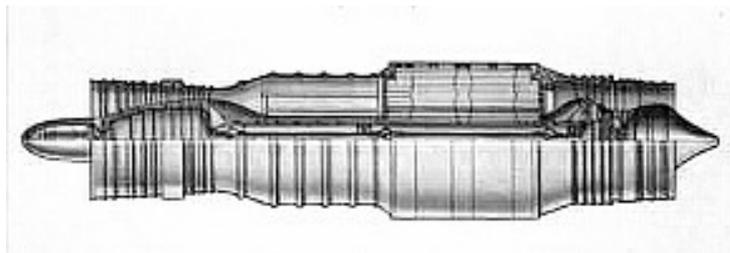


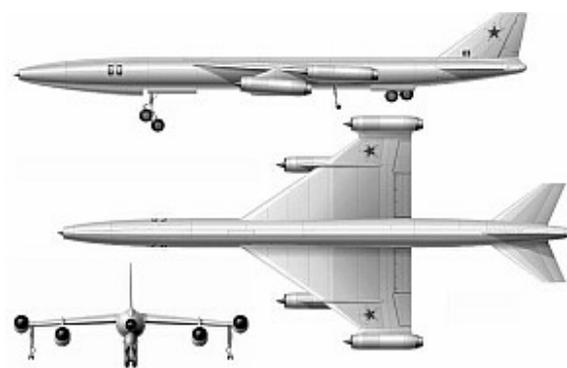
Рис.16 Атомный ТРД "соосной" схемы

Экипаж предполагалось разместить в глухой капсуле с мощной многослойной защитой из специальных материалов. Радиоактивность атмосферного воздуха

исключала возможность использования его для наддува кабины и дыхания. Для этих целей пришлось использовать кислородно-азотную смесь, получаемую в специальных газификаторах путем испарения жидких газов, находящихся на борту. Отсутствие визуального обзора должно было компенсироваться перископами, телевизионным и радиолокационным экранами, а также установкой полностью автоматической системы управления самолетом. Последняя должна была обеспечивать все этапы полета, включая взлет и посадку, выход на цель и т.д. Это логически подводило к идее беспилотного стратегического бомбардировщика. Однако в ВВС настаивали на пилотируемом варианте как более надежном и гибком в использовании.

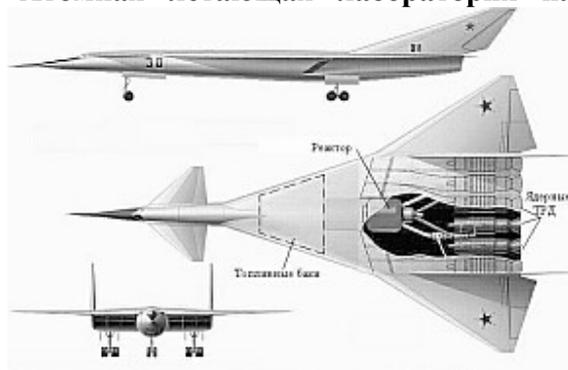
Проект стратегического атомного бомбардировщика М-60





Компоновка атомного гидросамолета Мясищева

Атомная летающая лаборатория на



базе

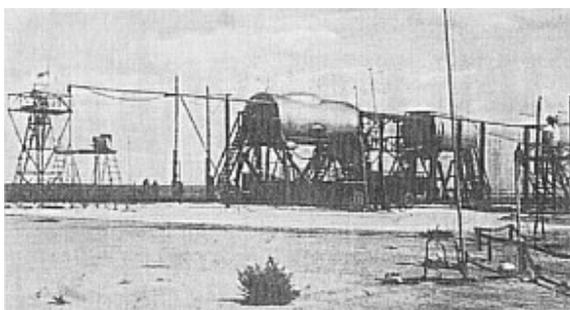
М-50

Стратегического атомный бомбардировщик М-30

Рис.17 Проекты атомных бомбардировщиков (СССР)

Ядерные турбореактивные двигатели для М-60 развивали взлетную тягу 22500 кгс. ОКБ А.М.Люльки разрабатывало их в двух вариантах: «соосной» схемы, в которой кольцевой реактор располагался позади обычной камеры сгорания, и сквозь него проходил вал турбокомпрессора; и схемы «коромысло» - с изогнутой проточной частью и выведением реактора за пределы вала. В.М.Мясищев начал разработку проекта летающей лаборатории на основе М-50, на которой один атомный двигатель размещался в носовой части фюзеляжа. С целью радикального повышения живучести баз атомных самолетов в случае начала войны было предложено отказаться от использования бетонных взлетно-посадочных полос, а атомный бомбардировщик превратить в сверхзвуковую летающую лодку М-60М. Взлетно-посадочные устройства включали в себя носовую гидролыжу, подфюзеляжные выдвигаемые подводные крылья и поворотные поплавки боковой устойчивости на концах крыла. Шесть ядерных турбореактивных двигателей располагались в хвостовой части самолета. Реактор размещался в фюзеляже. В качестве теплоносителя использовался жидкий металл: литий или натрий. Закрытый цикл работы реакторной установки позволял сделать кабину экипажа вентилируемой атмосферным воздухом и намного снизить вес защиты. При взлетной массе 170 т масса двигателей с теплообменниками 30 т, защита реактора и кабины экипажа 38 т, полезная нагрузка 25 т. Длина самолета 46 м при размахе крыла 27 м.

Первый полет М-30 планировался на 1966, однако ОКБ-23 Мясищева не успело приступить к рабочему проектированию. Постановлением правительства ОКБ-23 Мясищева привлечли к



разработке многоступенчатой баллистической ракеты и работы над атомным самолётом в этом КБ были прекращены.

Рис.18. Наземный стенд для испытаний реактора (Семипалатинск)

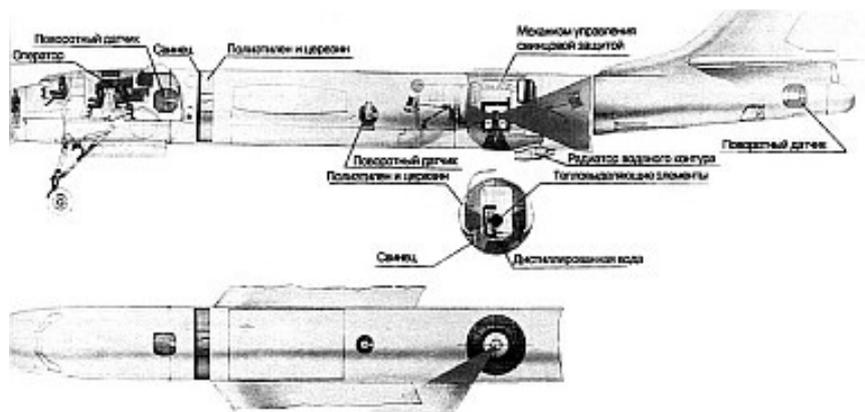
В отличие от коллектива В.М.Мясищева, создававшим сверхзвуковой стратегический самолет, перед ОКБ-156 А.Н.Туполева 28.03.1956 поставили задачу оснастить реактором уже существующую машину (Ту-95), т.е. создать летающую атомную лабораторию (ЛАЛ). Если ОКБ-23 предлагало поместить экипаж в капсулу со сферической защитой постоянной во всех направлениях толщины, то ОКБ-156 применило защиту переменной толщины. При этом максимальная степень защиты предусматривалась лишь от прямого излучения реактора, т.е. находилась сзади пилотов. А боковое и переднее минимальное экранирование кабины обеспечивало поглощение излучения, отраженного от окружающего воздуха. Для оценки уровня отраженного излучения и ставили летный эксперимент.

В 1958 на одном из аэродромов под Семипалатинском (база Половинка) был построен наземный испытательный стенд на основе средней части фюзеляжа Ту-95. Радиационная защита изготовлялась с использованием новых для авиации материалов, для производства которых потребовались новые технологии. Они были разработаны в под руководством А.С.Файнштейна. В июне 1959 реактор был пущен. Вскоре удалось выйти на заданный уровень мощности, опробовать приборы управления и контроля радиации, систему защиты, выработать рекомендации экипажу ЛАЛ. Одновременно подготовили и реакторную установку для ЛАЛ (конструктор академик Н.Д.Кузнецов). Топливный элемент представлял собой трубку из оксида бериллия (замедлитель нейтронов) забитую оксидом урана, высокообогащенным по урану-235. Двигатель был прямоточным. Рабочее вещество – горячий воздух. Реактор не был окружен со всех сторон защитой – использовалась концепция «теневого защиты», то есть экран предохранял от прямого потока нейтронов только пилота и груз (бомбы).

В летающую лабораторию Ту-95ЛАЛ был переоборудован серийный стратегический бомбардировщик Ту-95М с четырьмя турбовинтовыми двигателями НК-12М мощностью по 15000 л.с. Экипаж и экспериментаторы находились в передней герметической кабине, где также размещался датчик, фиксирующий проникающее излучение. За кабиной был установлен защитный экран из свинцовой 5-см плиты и комбинированных материалов (полиэтилен и церезин) общей толщиной около 20 см. В бомбоотсеке, где в будущем должна была располагаться боевая нагрузка, был установлен второй датчик. За ним, ближе к хвосту самолета, располагался реактор. Третий датчик находился в задней кабине машины. Еще два датчика смонтировали под консолями крыла в несъемных металлических обтекателях.

Реактор был окружен мощной защитной оболочкой, состоявшей из свинца и комбинированных материалов, и никакой связи с двигателями самолета не имел - служил только источником излучения. Дистиллированная вода использовалась как замедлитель нейтронов и как теплоноситель. Нагретая вода отдавала тепло в промежуточном теплообменнике, входивший в замкнутый первичный контур циркуляции воды. Через его металлические стенки тепло отводилось в воду вторичного контура, в котором рассеивалось в водо-воздушном радиаторе. Последний продувался в полете потоком воздуха через большой воздухозаборник под фюзеляжем. Реактор немного выходил за обводы фюзеляжа самолета и прикрывался металлическими обтекателями сверху, снизу и по бокам. Поскольку круговая защита реактора считалась достаточно эффективной, в ней были предусмотрены открываемые в полете окна для проведения экспериментов по отраженному излучению. Окна позволяли создавать пучки излучения в различных направлениях. Управление их открытием и закрытием производилось с пульта экспериментаторов в кабине экипажа.

В 1959-1960 эксперименты проводились на наземном стенде, а в 1961-1962 – на летающем самолёте (36 полетов). В испытаниях исследовали закономерности рассеяния нейтронов и гамма-квантов реактора в воздухе, от земли и конструкций самолёта, изучали влияние излучений реактора на бортовую систему радиосвязи при различных режимах функционирования летательного аппарата, проводили медико-биологические исследования комбинированного



воздействия факторов полёта и излучений реактора на членов экипажа, отработывали технологию аэродромного обслуживания и предполётной подготовки ядерной установки самолёта.

Рис.19 Размещение реактора и датчиков облучения на Ту-95ЛАЛ



Рис.16 Летаящая атомная лаборатория на базе самолета ТУ-95

Испытания Ту-95ЛАЛ показали достаточно высокую эффективность примененной системы радиационной защиты, но при этом выявили ее громоздкость, слишком большой вес и необходимость дальнейшего совершенствования. А главной опасностью атомного самолета была признана возможность его аварии и заражения больших пространств ядерными компонентами.



Рис.27 Ту-95ЛАЛ. На переднем плане -контейнер с датчиком излучения

Данные, полученные в ходе испытаний Ту-95ЛАЛ, позволили разработать крупномасштабную, рассчитанную на два десятилетия программу развития тяжелых боевых самолетов с ядерными силовыми установками и приступить к ее реализации. Важным этапом на этом пути должен был стать экспериментальный самолет «119» (Ту-119) с двумя обычными турбовинтовыми двигателями НК-12М и двумя разрабатывавшимися на их основе атомными

НК-14А. Последние работали по закрытому циклу и во время взлета и посадки имели возможность использовать обычный керосин. По сути, это был тот же Ту-95М, но с реактором по типу ЛАЛ и системой трубопроводов от реактора к внутренним двигателям. Поднять в воздух эту машину предполагалось в 1974. По замыслу Туполева, Ту-119 был призван играть роль переходного к самолету с четырьмя НК-14А, основным назначением которого должна была стать противолодочная оборона. За основу собирались взять пассажирский Ту-114, в сравнительно



«толстый» фюзеляж которого легко вписывались и реактор, и комплекс противолодочного вооружения.

Рис.28. Ту-95ЛАЛ. Обтекатели и воздухозаборник реактора

Программа предполагала, что в 1970-х гг. начнется проработка серии атомных сверхзвуковых тяжелых самолетов под единым обозначением «120» (Ту-120). Предполагалось, что все они будут оснащены ядерными ТРД закрытого цикла разработки ОКБ Н.Д.Кузнецова. Первым в этом ряду должен был стать дальний бомбардировщик. Самолет выполнялся по нормальной аэродинамической схеме и представлял собой высокоплан со стреловидными крылом и оперением, велосипедным шасси, реактором с двумя двигателями в хвостовой части фюзеляжа, на максимальном удалении от кабины экипажа. Вторым проектом был маловысотный ударный самолет с низкорасположенным треугольным крылом. Третьим стал проект дальнего стратегического бомбардировщика с шестью ТРД (из них два атомных), по общей компоновке близкий к американскому сверхзвукового бомбардировщику В-58.

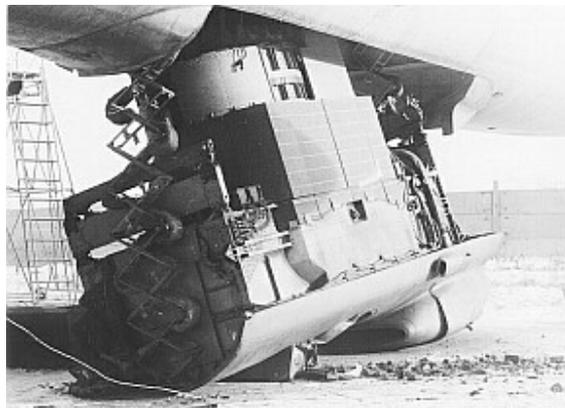


Рис.29. Ту-95ЛАЛ. Демонтаж реактора.

Этим проектам не удалось воплотиться в реальные конструкции. Причины были такими же, что и в США. Главная – атомный бомбардировщик оказался неподъемно сложной и дорогой системой вооружения. Только что появившиеся межконтинентальные баллистические ракеты решали задачу тотального уничтожения противника гораздо дешевле, быстрее и, если так можно выразиться, гарантированной. И всё же работы по развитию атомных самолетов были прекращены не столько по техническим причинам, сколько из-за требований экологической безопасности. Действительно, катастрофа с атомным самолетом может привести к существенному радиационному загрязнению местности и большим жертвам.

В СССР прекращение проектирования атомного бомбардировщика не означало отказа от ядерной силовой установки как таковой. Военно-политическое руководство СССР отказалось лишь от использования атомного самолета в качестве средства доставки оружия массового поражения непосредственно к цели. Эту задачу возложили на баллистические ракеты, в т.ч. базирующиеся на подводных лодках. Субмарины могли скрытно месяцами дежурить у берегов Америки и в любой момент нанести молниеносный удар с близкого расстояния. Естественно, американцы стали предпринимать меры, направленные на борьбу с советскими подводными ракетноносцами, и лучшим средством такой борьбы оказались специально созданные атакующие подлодки. В ответ советские стратеги решили организовать охоту на эти скрытные и подвижные корабли, да еще в районах, удаленных на тысячи миль от родных берегов. Было признано, что наиболее эффективно с такой задачей мог бы справиться достаточно большой противолодочный самолет с неограниченной дальностью полета, обеспечить которую мог только атомный реактор.

Сверхдальнюю машину ПЛО решили создавать на базе самого большого самолета мира тех лет Ан-22 «Антей» в 1965. Внимание военных «Антей» привлек благодаря большому внутреннему объему фюзеляжа, идеально подходящему для размещения большого боекомплекта противолодочного оружия, рабочих мест операторов, помещений для отдыха и реактора. Силовая установка включала двигатели НК-14А. На взлете и посадке они должны были использовать

обычное топливо, развивая 13000 э.л.с., а в полете их работу обеспечивал реактор (8900 э.л.с.). Расчетную продолжительность барражирования определили в 50 часов, а дальность полета - 27500 км. Хотя, конечно, «в случае чего» Ан-22ПЛО должен был находиться в воздухе «сколько надо» - неделю, две, пока не откажет матчасть.

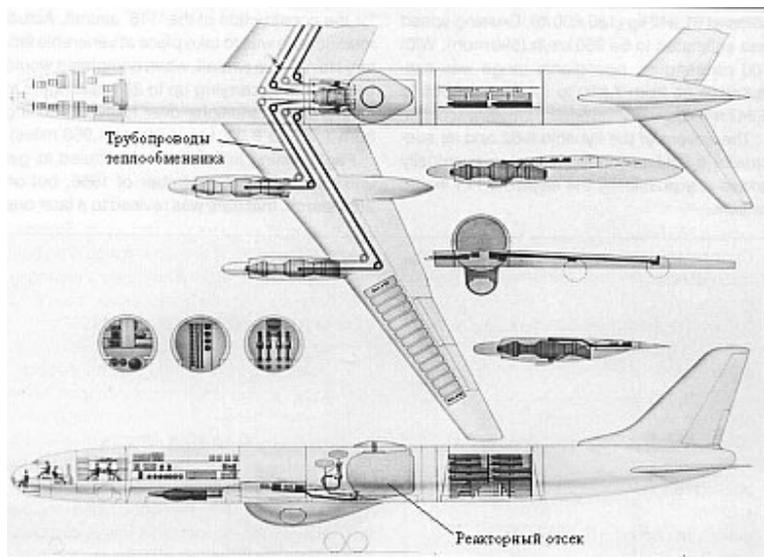


Рис.30 Проект атомного противолодочного самолета на базе Ту-114

За кабиной пилотов расположили отсек операторов противолодочного оружия, бытовые помещения, спасательный катер на случай посадки на воду, биозащиту и сам реактор. Противолодочное оружие разместили в обтекателях шасси. Вскоре оказалось, что проект не связывается по весу, он настолько тяжел, что четыре НК-14А не могут поднять его в воздух. Вес сэкономили на защите реактора, одновременно повысив ее

эффективность, путём выполнения её в виде многослойной капсулы из различных материалов, окружающей реактор со всех сторон. Реактор разрабатывался под руководством А.П.Александрова. Он имел собственные системы управления, электропитания и др. Управление реактора осуществлялось выдвиганием угольных стержней из активной зоны, а также перекачкой воды во внешнем контуре. В аварийной ситуации стержни не просто быстро задвигались в активную зону – они туда выстреливались.

Лётные испытания с действующим реактором на борту проводились на Семипалатинском полигоне в 1972 (программа «Аист»). Они завершились успешно, были получены необходимые данные для проектирования достаточно эффективной и безопасной авиационной ядерной силовой установки. Благодаря новой защите и закрытому циклу радиационное заражение конструкции самолета и воздуха сводилось к минимуму, а в экологическом плане такая машина даже имела преимущества перед самолетами на химическом топливе: если все исправно работает, то выхлопная струя атомного двигателя не содержит ничего, кроме чистого нагретого воздуха. На случай же летного происшествия проблемы экологической безопасности в проекте Ан-22ПЛО не были решены в достаточной мере. Выстреливание угольных стержней в активную зону действительно прекращало цепную реакцию, но если реактор не поврежден!

Конструкторы и ученые продолжали поиск решения проблемы. Тем более, что кроме противолодочной функции, атомному самолету нашли новое применение. Оно возникло как логическое развитие тенденции повышения неуязвимости пусковых установок межконтинентальных баллистических ракет в результате придания им мобильности. В начале 1980 США разработали стратегическую систему MX, в которой ракеты постоянно перемещались между многочисленными укрытиями, лишая противника возможности уничтожить их точечным ударом. В СССР межконтинентальные ракеты установили на автомобильное шасси и железнодорожные платформы. Следующим шагом было поместить их на самолет, который бы барражировал над своей территорией либо над океанскими просторами. Ввиду своей подвижности он был бы неуязвим для средств ракетного нападения противника. Главным качеством такого самолета было как можно большее время пребывания в полете, а значит, ядерная силовая установка подходила ему как нельзя лучше.

Наконец, было найдено решение, гарантирующее ядерную безопасность даже в случае летного происшествия. Реактор вместе с первичным контуром теплообмена выполнялся в виде

автономного блока, оснащенного парашютной системой и способного отделиться от самолета в критический момент и выполнить мягкую посадку. Таким образом, даже если бы самолет разбился, опасность радиационного заражения местности была бы незначительной.

Реализации этого проекта помешал конец «холодной войны» и распад Советского Союза.

3. БОЕВЫЕ РАКЕТЫ НА БАЗЕ ЯРД

Созданием боевых межконтинентальных баллистических ракет (в первую очередь для доставки к цели тяжёлых водородных бомб), на базе ядерного реактивного двигателя (ЯРД) в СССР и США начали заниматься в конце 50-х годов прошлого века, т.е. ещё до создания стратегических ракет, работающих на химическом топливе.



Рис.31. Крылатая атомная ракета со сверхзвуковым прямоточным воздушным реактивным двигателем с нагревом воздуха в реакторе

В СССР задача разработки экспериментальной крылатой ракеты «375» с ядерным прямоточным воздушно-реактивным двигателем конструкции ОКБ-670 М.М.Бондарюка была поставлена перед ОКБ-301, возглавляемым С.А.Лавочкиным. Место обычной камеры сгорания в этом двигателе занимал реактор, работавший по открытому циклу – воздух протекал прямо сквозь активную зону, нагревался до высокой температуры и выбрасывался наружу, создавая тягу. За основу конструкции планера ракеты были приняты разработки по межконтинентальной крылатой ракете «350» на обычном топливе. Однако тема «375» не получила развития, а смерть С.А.Лавочкина в июне 1960 поставила точку в этих работах. США также отказались от боевых межконтинентальных ракет с ядерным двигателем, из-за создания надёжных стратегических ракет на химическом топливе. Реально ни США, ни СССР (Россия) никогда не планировали применения ЯРД в космических войнах, что отрицательно сказалось на их создании.

4. КОСМИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ

Ученые и инженеры, работающие в области космонавтики, всегда стремились создавать наиболее эффективные ракетные двигатели. В частности, они пытались использовать ядерную энергию для нагрева рабочего тела, т.к. это позволяло сделать доступным полет космонавтов на Марс и другие планеты, а также полёты автоматических зондов за пределы Солнечной системы. Однако всевозможных трудностей, в том числе финансовых, возникло очень много, и сегодня ни Россия, ни США не имеют пригодных для установки на космический аппарат ядерных ракетных двигателей (ЯРД). Всё же и СССР и США примерно в одно время создали и испытывали на стендах прототипы таких двигателей.

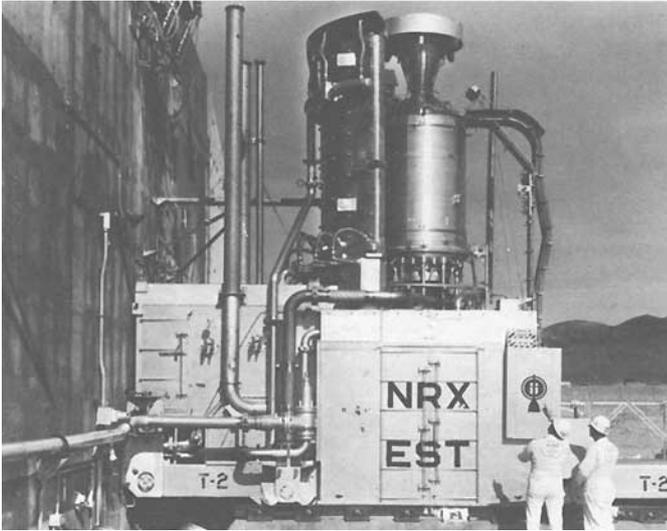
4.1 Америка

В США работы по созданию ядерного ракетного двигателя «НЕРВА» (NERVA - Nuclear Engine for Rocket Vehicle Application) были начаты в 1960 совместно с Комиссией по атомной энергии. Полученные в самом начале работ по программе «Ровер» в Лос-Аламосской лаборатории обнадеживающие результаты послужили поводом для того, чтобы президент Кеннеди в своей речи в 1961, посвященной планам высадки на Луну, призвал к ускорению работ по созданию ядерных ракетных двигателей, «которые обещают новые возможности в осуществлении заманчивых и беспрецедентных по масштабам исследований космоса за пределами лунной орбиты». Весной 1969 были завершены наземные испытания «Экс-Ф Прайм», прототипа ядерного двигателя.

По программе NERVA был разработан графитовый реактор, охлаждаемый жидким водородом, который испарялся, нагревался и выбрасывался через ракетное сопло. Графит был выбран из-за его высокой температурной стойкости. По проекту NERVA ЯРД должен был

развивать тягу 1100 кН в течение одного часа и иметь удельный импульс 800 сек, что почти вдвое превышает соответствующий показатель для химических двигателей.

Отработка ЯРД велась сразу на опытных полноразмерных реакторах без сопла - Kiwi. При этом тепловыделяющие элементы часто разрушались из-за трещин в защитном покрытии. До 1972 прошли испытания 20 ядерных реакторов, в том числе система NRX-A6 в течение одного часа работы реактора на полной мощности. 28 запусков стендовых ЯРДов имели суммарную продолжительность 4 ч. Испытания проходили на полигоне в штате Невада. В одном из вариантов ЯРД NERVA предварительно подогретый в рубашке охлаждения сопла и корпуса реактора



водород поступал в тепловыделяющие сборки, где за счет специально развитой поверхности теплообмена обеспечивался его нагрев до 2360 К. Часть горячих газов отбиралась для привода турбины турбонасосного агрегата, что обеспечивало расход водорода до 40,7 кг/с и тягу 33,6 т при тепловой мощности реактора 1510 МВт и массе 3400 кг.

Рис.32 Ядерная ракетная система подготовлена для испытания двигателя в Испытательном центре в шт. Невада. Реактор и сопло отчетливо видны над надписью NRX (NERVA Reactor Experiment - испытания реактора «Нерва»).

В январе 1973 изменение приоритетов в стратегии развития американской науки и техники заставило НАСА отказаться от своих планов осуществления пилотируемых межпланетных полетов и создания для этих целей ЯРД. Однако в начале 21-го века НАСА снова начала рассматривать возможности проведения полетов на Марс и создания там базы.

Кроме программы «НЕРВА», нацеленной на разработку ядерных двигателей с твердой активной зоной, создаётся ЯРД с газообразной зоной, удельная тяга которого лежит в диапазоне 1500–1600 с. Проект «Ровер» стал основой для разработки ЯРД, предназначенных для пилотируемого полета на Марс. Это - летный вариант компактного, размерами с письменный стол, реактора, мощность которого соответствует приличной гидроэлектростанции. В Центре им. Льюиса проведены оценки различных схем ядерных двигателей применительно к полету на Марс с возвращением корабля на Землю. Рассматривались: схема ядерного двигателя с твердой активной зоной и три схемы с газовой активной зоной — с регенеративным охлаждением элементов двигателя, со сбросом тепла в космос посредством излучателя и с прозрачными стенками, ограничивающими активную зону (типа «лампа»). Рассчитаны массы космических кораблей, стартующих к Марсу с околоземной орбиты, для различных по своим задачам экспедиций — краткосрочная экспедиций без высадки на Марс продолжительностью не более 200 суток и научно-исследовательская экспедиция с обстоятельным изучением планеты в течение 40-дневного пребывания на ней, посредством оставляемого на Марсе специального мобильного блока массой 140 т. Схема ядерного ракетного двигателя с регенеративным охлаждением и замкнутая цепь (или схема «лампа») позволят осуществить такую экспедицию за год, а краткосрочную — за 150 суток, при стартовой массе 130 т. Обеспечивающая большую удельную тягу схема со сбросом тепла в космос посредством излучателя позволит осуществить экспедицию за 200 суток, при стартовой массе 130 т, а краткосрочную - за 80 суток, при стартовой массе 90 т.

Недостатком ЯРД является радиоактивное излучение, основным источником которого служит активная зона ядерного реактора. Летом 1985 была развернута программа «Проджект Форкаст 2» (Project Forecast 2), нацеленная на поиск новых решений с высокими характеристиками. В фокусе исследований - создание безопасного компактного ядерного

двигателя для межорбитального транспортного аппарата. В Лаборатории космической техники начаты исследования по разработке двигателя с делящимся веществом в виде мелких частиц. Особое внимание уделено предотвращению нежелательных воздействий реактора на биосферу Земли при аварийном прекращении полета. Опыт, накопленный в ходе работ по проекту «Ровер» и программе «НЕРВА», показывает, что риск, связанный с конструкцией ядерной двигательной установки и ее эксплуатацией, может быть ограничен вполне приемлемыми пределами.

В 2005 в США принята программа разработки ЯРД для экспедиции, организованной на Марс в ближайшие 10 лет. Создание ракеты с ядерной двигательной установкой стало главным для NASA приоритетом в научно-исследовательских работах. Новый двигатель должен в три раза увеличить скорость полета ракеты и сократить время перелета до Марса до двух месяцев. При этом возможно будет применен газофазный ядерный двигатель, в котором медленно движущаяся газовая струя делящегося плутония окружена более быстрым потоком охлаждающего водорода.

Интересная идея создания двигателя, использующего реакцию аннигиляции материи и антиматерии, изучалась в рамках программы стратегической оборонной инициативы (СОИ) США. Антивещество в виде атомов хранится в электромагнитной ловушке и посредством магнитного поля подается в камеру двигателя, где оно взаимодействует с обычным веществом, превращаясь в гамма-излучение, которое нагревает рабочую жидкость и создает реактивную струю. Хотя магнитные ловушки используются в физике высоких энергий, для получения нескольких граммов антивещества, необходимых для полета, требуется огромное количество энергии.

4.2 СССР (Россия)

В СССР решение о создании ядерных стратегических ракет и ракет космического назначения было принято в 1957. Реальные эксперименты в этом направлении были начаты, после пуска на Семипалатинском полигоне импульсного реактора ДООУ-3 («До моего третьего удара», – шутил И.В.Курчатов. Реактор был пущен после его смерти). Ректор выдавал мощные потоки нейтронов и использовался для испытания радиационной стойкости материалов, топливных сборок и т.п. На этом реакторе удалось нагреть струю водорода до температуры 3000°С. В 1961 на Семипалатинском полигоне был запущен реактор ИГР и начаты первые эксперименты. В 1975-1989 на реакторе ИВГ-1 выполнена отработка тепловыделяющих сборок на ресурс в форсированном режиме при температурах до 3100 К и тепловых потоках 20 кВт/см³ (на порядок выше, чем в США). А на стендовом реакторе ЯРД минимальной размерности ИРГИТ проводились запуски при мощности 60 МВт и температуре 2650 К.

В 70-80-е годы КБ "Салют", КБ химавтоматики, ИАЭ, НИКИЭТ и НПО "Луч" (ПНИТИ) разработали различные проекты космических ЯРД и ядерных энергодвигательных установок. В КБ химавтоматики создавались ЯРД РД 0411 и ядерный двигатель минимальной размерности РД 0410 тягой 40 и 3,6 т соответственно. В результате были изготовлены реактор, «холодный» двигатель и стендовый прототип для проведения испытаний на газообразном водороде. В отличие от американского, с удельным импульсом не больше 8250 м/с, советский ЯРД за счет более жаростойких и совершенных по конструкции тепловыделяющих элементов и высокой температуры в активной зоне имел этот показатель равным 9100 м/с. Стендовая база «Байкал-1» для испытаний ЯРД размещалась в 60 км юго-западнее г. Семипалатинск-21. Она начала работать в 1962-м. В 1971-1978 на полигоне испытывались тепловыделяющие элементы прототипов ЯРД. С 1970 по 1988 год проведено около 30 «горячих» пусков реакторов. При этом мощность не превышала 230 МВт при расходе водорода до 16,5 кг/с и его температуре на выходе из реактора 3100 К. Все запуски прошли успешно и безаварийно.

Конструкторы ОКБ-11 С.П.Королева рассматривали несколько вариантов космических и боевых ракет, оснащенных ядерными ракетными двигателями (ЯРД). В качестве рабочего тела оценивались вода и сжиженные газы – водород, аммиак и метан. На созданных прототипах ЯРД достигнуты экстремальные для ядерных реакторов значения удельной мощности и температуры рабочего тела. Газоохлаждаемый реактор размером с небольшой бочонок имел параметры:



мощность 200 МВт, температуру газа 3200К, время непрерывной работы 10 минут и при этом излучал 2×10^{15} н*см²/с. Экспериментальный РД-0410 имел тягу 3,6 т при массе (вместе с радиационной защитой и рамой крепления) 2 т. Выигрыш очевиден.

Рис.33 Модель водородного ЯРД типа РД-0410 (разработчик «КБ химавтоматики», г.Воронеж)

Двигатель РД-0410 за 10 включений в течение 1 часа выдаёт тягу 3.6 т и скорость истечения 8,93 км/с при тепловой мощности реактора 196 МВт. Агрегат с теневой защитой, но без высотного сопла имеет длину 3.6 м, диаметр 1.6 м и массу 2 тонны. Нужно отметить, что размерность выбиралась такой, чтобы можно было испытать установку на существующих стендах. Но имеющиеся технологии позволяют, без принципиальных изменений конструкции и почти не меняя размеров и массы, создать двигатель тягой 40 тонн - для межпланетных кораблей, стартующих с околоземной орбиты этого больше чем достаточно. Можно и больше, но тогда нужно

перекомпоновывать тепловыделяющую сборку. Управление реактором осуществляется не стержнями, вводимыми в активную зону, а поворотными барабанами, заполненными карбидом бора, и расположенными в бериллиевом отражателе по ее периферии. Понятно, что такая схема (кстати, типовая для отечественных реакторов космического назначения, и известном «Топазе» то же самое) работает только при определенной геометрии реактора.

Масса силовой установки, использующей ядерные реакции деления, может быть всего порядка сотни килограммов (и даже меньше) а мощность при этом многократно превышать мощность двигателя внутреннего сгорания такой же массы. Вряд ли кто-то решится ставить ядерные реакторы на самолёты или автомобили. В космосе же требуются большая мощность и продолжительность работы двигателя при минимальном весе топлива, поэтому для космических транспортных систем будущего ядерная энергия может оказаться самой перспективной.

Разработка ракет с ядерными двигателями, предназначенных для вывода на орбиту искусственных спутников земли, была остановлена по экологическим причинам. Однако, ядерные ракеты для межпланетных путешествий продолжают разрабатываться. Предполагается, что на таких ракетах будут установлены высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы, в которых в качестве теплоносителя используется водород.

4.3 Типы ЯРД космического назначения

Жидкостные (химические) ракетные двигатели открыли человеку дорогу в космос - на околоземные орбиты. Но дальше двигаться на этой энергетической базе бессмысленно: скорость истечения реактивной струи в них не превышает 4.5 км/с, а для межпланетных полетов нужны десятки километров в секунду. А чтобы получить конечную скорость больше скорости истечения нужно, чтобы отбрасываемая масса была значительно больше остающейся. В свою очередь, для дальних полетов эта конечная масса тоже не маленькая...

Следующим звеном ракетных двигателей стали ЯРД.

Ядерный ракетный двигатель - ракетный двигатель, рабочим телом в котором служит либо какое-либо вещество (водород), нагреваемое за счет энергии, выделяющейся при ядерной реакции или радиоактивном распаде, либо непосредственно продукты этих реакций. Различают радиоизотопные, термоядерные и собственно ядерные ракетные двигатели (используется энергия деления ядер).

ЯРД получили свое название благодаря тому, что создают тягу за счет использования ядерной энергии, т. е. энергии, которая выделяется в результате ядерных реакций. Ядерную энергию в ракетных двигателях можно использовать тремя способами: **1.** Высвобождаемая энергия используется для нагрева рабочего тела, которое затем расширяется в сопле, так же как в обычном

ЖРД. 2. Ядерная энергия преобразуется в электрическую и затем используется для ионизации и разгона частиц рабочего тела. 3. Наконец импульс создается самими продуктами деления, образованными в процессе ядерной реакции деления. Сейчас существует много видов ЯРД.

4.3.1 Ядерный взрывной двигатель

Использование энергии атомного взрыва. В 1960-х годах НАСА и Комиссия по атомной энергии США исследовали довольно экзотический метод получения тяги в рамках проекта «Орион». В этом методе разгон ракеты до большой скорости, необходимой для полета к другим планетам, осуществлялся путем последовательных взрывов небольших атомных зарядов, выбрасываемых за ракетой. Специальные гасители должны были сглаживать воздействие взрывов. В рамках проекта «Орион» построено несколько моделей платформ из алюминия; вопрос состоял в том, выдержит ли она быстрый рост температуры и давления, создаваемых химическими взрывами. В 1959 состоялся 100-метровый полет платформы, обеспеченный шестью последовательными взрывами, который продемонстрировал, что импульсный режим полета может быть стабильным. Воздействие высоких температур столь кратковременен, что поток тепла в платформу невелик, и охлаждения платформы не требовалось. Эксперименты показали, что такие материалы, как алюминий или сталь, подходят для изготовления платформы. Проект «Орион» отменен в соответствии с международными договорами по ограничению ядерных вооружений.

4.3.2 Радиоизотопный ЯРД

Из всех возможных типов ЯРД наиболее разработан тепловой радиоизотопный двигатель (например, на базе рассмотренных в предыдущих лекциях атомных тепловых батарей, использующих энергию, выделяющуюся при распаде радионуклида). Ядерные энергоустановки обладают уникальными характеристиками, к которым относятся практически неограниченная энергоемкость, независимость функционирования от окружающей среды, неподверженность внешним воздействиям. Однако максимальная мощность нынешних ядерных радиоизотопных установок ограничена величиной порядка нескольких киловатт, поэтому нельзя надеяться на широкое применение радионуклидных двигателей в космонавтике.

4.3.3 ЯРД с реактором деления.

Этот тип ЯРД представляет собой сочетание атомного энергетического реактора с ракетным двигателем. Существует множество ЯРД на базе реактора деления: твердофазный; газофазный; жидкофазный и коллоидный; термоядерный; импульсный и др.

ЯРД значительно эффективнее жидкостного реактивного двигателя (ЖРД), но только в определенном диапазоне. Они не могут запускаться на Земле, не могут возвращаться на Землю из-за остаточной радиации. Они требуют тяжелой радиационной защиты. Ядерные двигатели предназначены исключительно для работы в космосе. И то на очень высоких орбитах (600 километров и выше), чтобы космический аппарат вращался вокруг Земли многие столетия. Потому что «период высвечивания» ЯРД составляет как минимум 300 лет.

Многие системы ЯРД устроены так же, как у жидкостного ракетного двигателя. Только температура рабочего тела, истекающего из сопла и создающего тягу, повышается не за счет реакции окисления (горения) двух компонентов, а за счет тепловой энергии, выделяющейся в процессе деления ядер. Вместо камеры сгорания, в ядерном двигателе размещен реактор, способный нагреть газ до высокой температуры. Эта температура ограничивается стойкостью применяемых материалов. В реакторе можно разогревать любой газ, а энергетическая эффективность ракетного двигателя тем выше, чем это рабочее тело имеет меньшую молекулярную массу. Поэтому, если в ЯРД применить водород, то скорость истечения его из сопла будет в 3 раза выше, чем в лучшем - кислородно-водородном ЖРД, т.к. молекулярная масса в первом случае - 2 г/моль, а во втором - 18. Значит, для космического полета потребуется существенно меньше рабочего тела.

Замечание. В проектах электронно-импульсного двигателя выдвинута еще более перспективная идея – в качестве рабочего тела использовать электроны, у которых «молекулярная масса» в 4000 раз меньше, чем у водорода.

В качестве рабочего тела могут быть применены жидкий водород, аммиак, гидразин. Удельные импульсы соответственно — 900, 500, 450 сек.

Один из возможных вариантов двигателей для отрыва от Земли - это устройства, в которых урановый ядерный реактор будет разогревать водород до 2500°C, затем этот водород будет смешиваться с атмосферным воздухом и сгорать при температуре 4000°C. Подобная система пригодна только для отрыва от Земли. Более того, включать её будут только на высоте 10 тысяч метров, а до этого ракету должен будет тянуть обычный ракетный двигатель на химическом топливе, чтобы в случае аварии минимизировать ущерб. Похожим образом, но без участия кислорода, предлагается двигать космический аппарат и в открытом космосе: разогретый в ядерном реакторе водород выбрасывается наружу через сопла, создавая двигательный импульс.

Делящееся вещество в активной зоне реактора может находиться в твердом, жидком или газообразном состоянии.

ЯРД с твёрдофазным реактором деления. Создание подобного ЯРД открывает перед космонавтикой большие перспективы, поскольку его можно использовать для дальних полетов. Реакторы состоят из тепловыделяющих сборок, содержащих соединение урана-235 с замедлителем нейтронов (для уменьшения массы урана с десятков до нескольких килограммов) и окруженных отражателем нейтронов, а также из устройств, обеспечивающих запуск, регулирование и останов.

Типичный твердофазный реактор имеет вид цилиндра с высотой и диаметром 1-2 м. Он включает активную зону; отражатель, окружающий эту зону; управляющие органы; силового корпуса и другие элементы. Активная зона содержит ядерное горючее - делящееся вещество (обогащенный до 90% уран), заключенное в тепловыделяющих элементах, и замедлитель. Тепловыделяющие элементы твердофазного реактора пронизаны каналами, по которым протекает, постепенно нагреваясь, рабочее тело. Каналы имеют диаметр порядка 1-3 мм, а их суммарная площадь составляет 20-30% поперечного сечения активной зоны. Активная зона подвешивается при помощи специальной решетки внутри силового корпуса, с тем чтобы она могла расширяться при нагреве реактора (иначе она разрушилась бы из-за термических напряжений). Активная зона испытывает высокие механические нагрузки, связанные с действием значительных гидравлических перепадов давления (до нескольких десятков атмосфер) от протекающего рабочего тела, термических напряжений и вибраций. В отличие от американского, с удельным импульсом не больше 8250 м/с, советский ЯРД за счет более жаростойких и совершенных по конструкции тепловыделяющих элементов и высокой температуры в активной зоне имел этот показатель равным 9100 м/с.

ЯРД с газообразной активной зоной (ГФЯРД). Дальнейшим развитием ЯРД является ядерная двигательльно-энергетическая установка на основе высокотемпературного газофазного реактора - ГФЯР. Возможны два типа ЯРД с газофазной активной зоной. В двигателе с удержанием ядерного горючего применяется вихревая закрутка или коаксиальные потоки для разделения газообразного ядерного горючего и рабочего тела во избежание смешения двух газов. В ЯРД с прозрачной ампулой также используются газодинамические силы для отделения газообразного ядерного горючего от стенок реактора, но в этом случае обеспечивается абсолютное разделение ядерного горючего и рабочего тела с помощью прозрачной ампулы.

В 50-е ядерные двигатели с газовой активной зоной привлекли внимание специалистов благодаря своим высоким характеристикам: в то время удельная тяга оценивалась величиной 6000 с при тяге, достигающей 130 кг. В 60-х рассматривались замкнутая и открытая схемы ядерных двигателей с газовой активной зоной. Реализация открытой схемы представляется более простой: необходимо лишь обеспечить требуемое содержание ядерного горючего путем соответствующей организации течения рабочего тела и управления реактором. Разогрев рабочего тела в ЯРД с твердофазным реактором ограничен температурой тепловыделяющих элементов и стойкостью их материала. А чем выше температура, тем больше удельный импульс двигателя. Однако если использовать газообразное ядерное топливо, то эта проблема снимается. Появляются возможности увеличения удельного импульса до 20-30 км/с при температуре рабочего тела до 12000К.

В основе одного из проектов такой установки - высокотемпературный ГФЯР со вспомогательными подвижными твердофазными тепловыделяющими сборками, которые обеспечивают критическую массу ядерного горючего. Основным элементом конструкции является одна или несколько рабочих камер, окруженных замедлителем-отражателем нейтронов. Ядерное горючее внутри камер удерживается изолированно от стенок в плазменном состоянии в количестве, необходимом для самоподдерживающейся цепной реакции. В промежутке между зоной делящейся плазмы и стенками организуется поток рабочего тела. Нагрев рабочего тела обеспечивается лучистым теплопереносом, при этом его температура на выходе рабочей камеры достигает 10000К. В центральной цилиндрической полости за счет магнитного поля соленоида, окружающего реактор, формируется малорасходная, «застойная», зона. Уран, находящийся в ней в газовой фазе, разогревает протекающий водород за счет распределенных в газе лучепоглощающих добавок и не смешивается с ним. Поглощение лучистой энергии рабочим телом обеспечивает одновременно и тепловую защиту стенок. Истекающая из сопла плазма обладает высокой электропроводностью и обеспечивает получение электрической энергии во встроенном в сопло МГД-генераторе. Эта энергия необходима для питания соленоида, насосов, подающих рабочее тело, и бортовых систем аппарата. Удельный импульс ГФЯРД достигает 20000 м/с.

Газофазный ТВЭЛ заключён в ампулу, в которую непрерывно поступает ядерной топливо. Топливо представляет собой либо пасту, содержащую мелкодисперсный урановый порошок и щелочные металлы, либо расплав урана, разогреваемого непосредственно перед подачей в камеру. Ураносодержащая струя, поступающая в камеру, под действием нейтронного потока высокой интенсивности разогревается, испаряется и переходит в плазменное состояние. Излучение от этой плазмы нагревает рабочее тело. Внутренняя стенка входного конического участка рабочей камеры выполняется из тугоплавкого сплава. Эта стенка газопроницаема, что позволяет вдувать водород и гелий вместе со струей ядерного топлива. Тем самым исключается образование рециркуляционной зоны на участке испарения топлива и турбулизация потока. Вдуваемый водород, в свою очередь, даёт периферийный спутный поток, отделяющий стенки камеры от центральной струи урановой плазмы.

Основная проблема при разработке газофазного реактора – снижение потерь делящегося вещества, которые не должны превышать долей процента от расхода рабочего тела. Некоторая часть урана постоянно уносится потоком водорода в окружающее пространство, но система подачи ядерного горючего все время компенсирует его убыль. Вынос ядерного горючего компенсируется его подачей в рабочую камеру либо в жидкометаллическом виде (1500К), либо в виде пастообразной смеси порошка с NaK эвтектикой. Энергоснабжение космического аппарата с ГФЯРД на режиме выключенной рабочей камеры осуществляют две газотурбинные энергоустановки общей мощностью 200 кВт с нагревом рабочего тела в твердофазных тепловыделяющих сборках. ГФЯРД имеет тягу 17,3 т при давлении в рабочей камере 100 кг/см² и скорости истечения водорода 20 км/с. Продолжительность работы на номинальном режиме при пяти включениях - около 3,5 ч. Мощность МГД-генератора должна составлять 25 МВт.

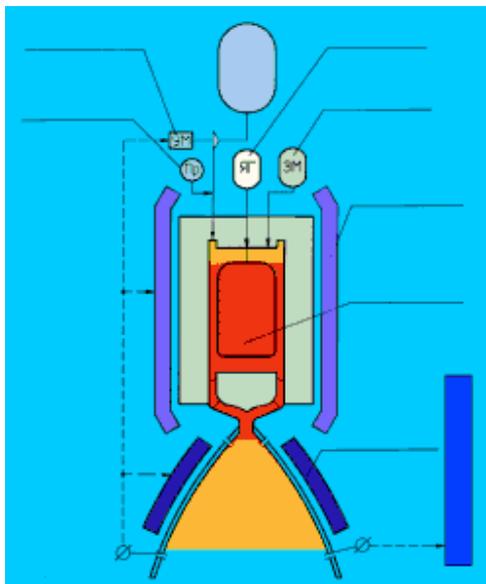


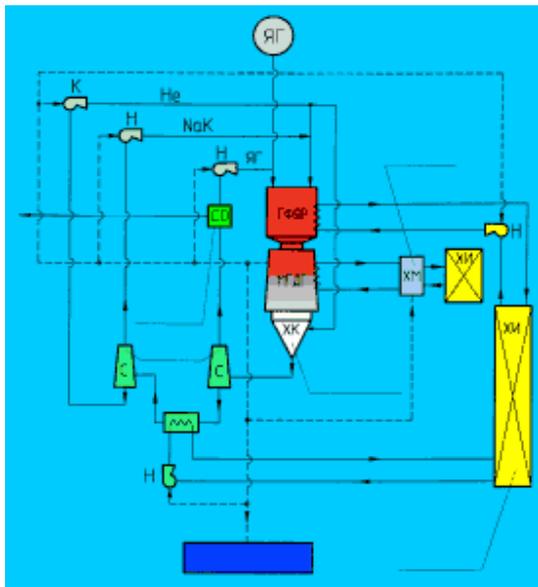
Рис.34 Газофазовый ядерный реактор, работающий по открытой схеме

Космические энергетические установки проектировались по открытой и замкнутой схемам. Если рабочее тело выбрасывается через реактивное сопло наружу, то установка представляет собой ядерный ракетный двигатель открытой схемы. В качестве рабочего тела используется водород, в который для обеспечения электропроводности и поглощения лучистого теплового потока добавляются присадки в виде паров NaK и Li, а также

вольфрамового порошка (при этом одновременно достигается приемлемая температура водорода у стенки камеры). Такой ЯРД имеет чрезвычайно высокие удельные характеристики (удельный импульс порядка 2000:3000 с). Если установка спроектирована таким образом, что рабочее тело выбрасывается наружу через МГД-генератор с высоким КПД, то имеем ЯКЭУ открытой схемы. Двигательная энергетическая установка открытой схемы (Рис.34) включает в себя однополостной реактор с кольцевым выходным каналом и газофазным твэлом с застойной плазменной зоной ядерного горючего. Стабилизация зоны осуществляется с помощью мощного внешнего соленоида.

В установках замкнутой схемы (Рис.35) преобразователем энергии является МГД-генератор, а все рабочие компоненты циркулируют по контуру, не имеющему связи с внешней средой. ЯКЭУ имеет весьма высокий КПД (30:40 %), низкие значения удельной массы преобразователя и удельного расхода рабочего тела. Присадки, вводимые в рабочее тело, помимо всего прочего, призваны способствовать МГД-взаимодействию. Кроме газофазного реактора и МГД-генератора в конструкции присутствуют холодильники, сепараторы и насосы. Рабочим телом является пар NaK в смеси с гелием. Выделяющееся избыточное тепло сбрасывается в космическое пространство с помощью излучателей. Вырабатываемая энергия используется для различных целей, одним из ее потребителей может быть электроракетный двигатель.

Преимуществом использования в замкнутых схемах ГФЯР, в котором вместо твердых твэлов используются газообразные, является принципиальная возможность обеспечения весьма длительного функционирования за счет соответствующей подпитки горючим взамен выводимых из контура во внешнюю среду продуктов ядерных реакций. Существенное значение имеет и то обстоятельство, что в замкнутых схемах требование к выносу ядерного горючего из реактора вместе с рабочим телом менее строгое, чем в открытых. Это позволяет рассматривать более



простую организацию процессов, допускающих большую степень смешения ядерного горючего и рабочего тела. При этом отпадает необходимость в магнитной стабилизации - плазменная зона из застойной превращается в струйную. Использование нескольких таких зон (многополостной реактор) улучшает массогабаритные характеристики ГФЯР. Известно, что между тепловой мощностью реактора и возможностями обеспечения приемлемого температурного режима элементов конструкции существует определенная зависимость. Исследованиями было установлено, что оптимальная тепловая мощность ГФЯР открытой схемы должна быть не ниже 2 ГВт, а замкнутой - 300 МВт (при давлении в рабочей камере порядка 1000 кгс/см²).

Рис.35. Газофазовый ядерный реактор, работающий по закрытой схеме

Вследствие преимуществ одноступенчатого космического корабля, стартующего с Земли, наиболее перспективным вариантом ЯРД с газофазной активной зоной является двигатель с прозрачной ампулой. Основной двигатель имеет несколько параллельных газофазных ядерных реакторов-полостей, заключенных в оболочку, работающую под высоким давлением. Жидкий водород нагнетается через замедлитель-отражатель и сопло, обеспечивая регенеративное охлаждение, и нагревается в полостях до очень высокой температуры за счет теплообмена излучением. После этого горячий водород расширяется в сопле и, истекая, создает тягу. Мощный насос, подающий под давлением жидкий водород, приводится в действие турбиной, работающей на водороде, который поступает из системы регенеративного охлаждения двигателя.

В единичной полости ЯРД с прозрачной ампулой за счет вихревого движения потока образуется стабильное ядро из делящегося вещества. Вихревой поток создается тангенциальным впрыском оптически прозрачного охладителя. Реакция деления газообразного ядерного горючего повышает его температуру до

нескольких тысяч градусов; температура на внешней границе зоны удержания горючего достигает 5500 - 27500К. Энергия из этой зоны передается главным образом тепловым излучением, которое проходит через прозрачную стенку, и поглощается газообразным рабочим телом - водородом, поглощательную способность которого увеличивают путем ввода небольшого количества вещества-присадки. Благодаря поглощению энергии теплового излучения средняя температура рабочего тела повышается до величины, составляющей ~80% от температуры на внешней границе зоны удержания горючего (4400 - 22000К). При расширении водорода с такой температурой в сопле удельная тяга составляет от 1100 до 5000 сек.

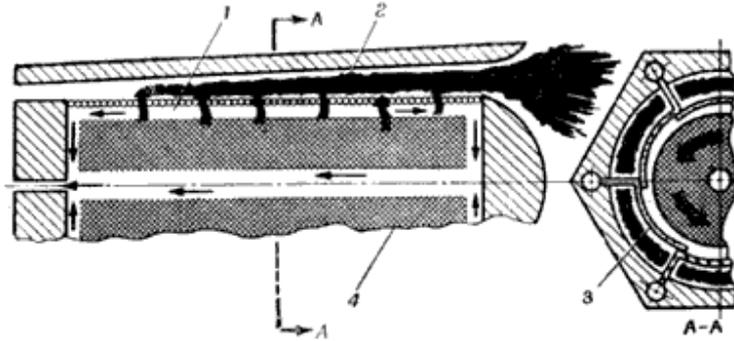


Рис.36. Геометрия единичной полости ЯРД с прозрачной ампулой. 1 - охладитель (гелий или неон); 2 - рабочее тело - водород $T = 4400 - 22000\text{K}$; $I_{\text{уд}} = 1100 - 5000$ сек; 3 - прозрачная стенка; 4 - газообразное ядерное горючее, $T = 5500 - 27\ 500\text{K}$.

(например, гелием). Охлаждающий газ после ввода в полость служит буферной зоной для поглощения осколков деления, а также обеспечивает вращение ядра, образованного горючим. Для предотвращения конденсации горючего на стенке и для уменьшения ее нагрева за счет теплопроводности, конвекции и осколками деления необходимо отделить газообразное ядерное горючее от прозрачной стенки. Часть ядерного горючего и продуктов деления захватывается буферным газом, а затем отделяется от охлаждающего газа в охлаждаемой системе рециркуляции, что позволяет осуществлять повторный впрыск горючего и охладителя в полость.

Первый ЯРД с прозрачной ампулой будет иметь регенеративное охлаждение. Его удельная тяга равна 1500 - 2000 сек. Дальнейшее повышение удельной тяги двигателя связано с применением высокотемпературных космических излучателей для отвода энергии нейтронного и гамма-излучения, накопленной в стенках замедлителя. Такой вариант двигателя будет иметь удельную тягу в вакууме до 5000 сек при приемлемых значениях отношений тяги к весу двигателя.

Ввиду того что ЯРД с прозрачной ампулой обеспечивает надежное удержание ядерного горючего и продуктов деления при отношении тяги к весу, существенно большем единицы, его можно будет применять для выполнения задач вывода на орбиту многоступенчатого космического корабля, стартующего с Земли и ускоряющегося в пределах земной атмосферы.

Электрореактивные двигатели. Удельная тяга электрореактивного двигателя более высокая и лежит в диапазоне 850–4400 с. Межорбитальный аппарат, снабженный электрореактивным ракетным двигателем, сможет доставлять с околоземной орбиты на геостационарную груз массой в три раза больший, чем с жидкостными двигателями на криогенных компонентах. Однако из-за низкой тяги электрореактивного двигателя продолжительность такой транспортировки увеличится до 200–400 суток, что может оказаться совершенно неприемлемым для некоторых грузов ввиду длительного нахождения в поясе Ван Аллена.

Ионные двигатели и двигатели Холла часто причисляют к электроракетным двигателям (тяга в которых обеспечивается за счёт электрической энергии). Рабочее тело ионизируется (реактивная струя ионов) и разгоняется электрическим (в ионных двигателях) или магнитным (в двигателях Холла) поле. Преимущество таких двигателей - чрезвычайно высокий удельный импульс (из-за высокой скорости реактивного ионного потока), гораздо выше чем у ЯРД.

Безопасность. С самого начала создания ЯРД особое внимание уделяли предотвращению нежелательных воздействий реактора на биосферу Земли при аварийном прекращении полета. Опыт показывает, что риск, связанный с конструкцией ядерной двигательной установки и ее эксплуатацией, может быть ограничен вполне приемлемыми пределами. ООН допускают возможность использования ядерных реакторов для освоения космического пространства при

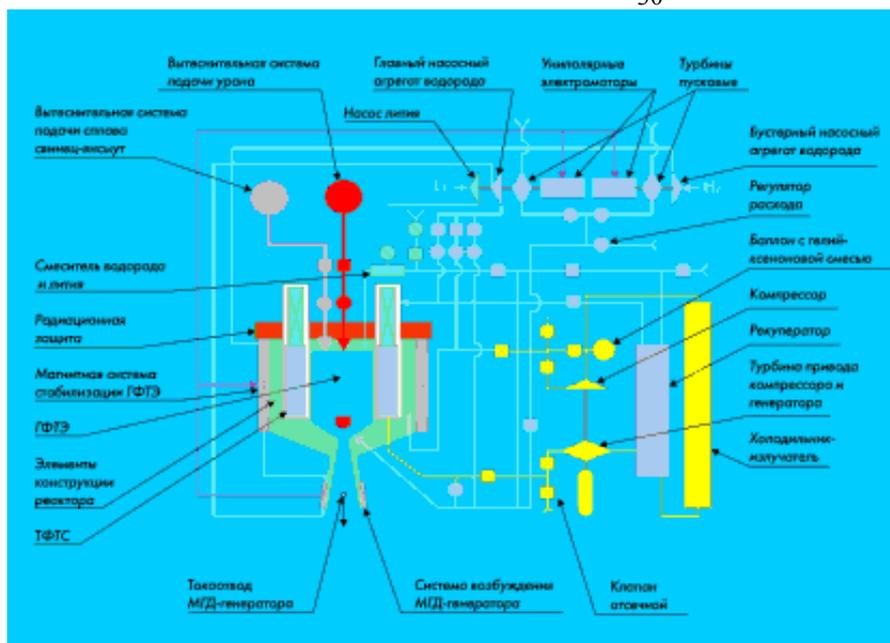
условии соблюдения мер безопасности. Эти меры подразумевают запрещение незапланированных критических режимов работы ядерных реакторов в космосе, устранение радиоактивных выбросов в случае аварий как на запуске, так и в полете, сохранение в допустимых пределах уровня радиационного облучения экипажа и обеспечение надежной работы двигательной установки.

В случае полета ракеты с ядерным двигателем запуск реактора будет осуществляться на орбите сборки космического корабля. До момента старта корабля со сборочной орбиты реактор будет находиться на нулевом уровне мощности, а после выведения реактора на рабочий режим космический аппарат начнет свое ускоренное движение от Земли. Время пребывания на сборочной орбите достаточен, чтобы уровень радиоактивности вышедшего из строя реактора постепенно снизился до безопасного при падении реактора на Землю. Посредством экранирования можно снизить радиоактивное облучение полезной нагрузки и экипажа до приемлемого уровня. Подбором формы топливного бака и других элементов аппарата, а также их размещением можно предельно снизить эффект вторичного излучения. Системы безопасности, включающие специальное диагностическое оборудование, позволят предотвратить возникновение отказов или разрушение систем и агрегатов, а контроль над заданным режимом работы реактора, осуществляемый экипажем и центром управления полетов, исключает возможность опасных отклонений от расчетного разгона и аварий на крейсерском режиме работы.

Особое место в системе безопасности занимает предотвращение радиоактивного загрязнения атмосферы и местности. В настоящее время проблема радиационной защиты космических аппаратов с ЯРД считается в принципе решенной. Решены также и принципиальные вопросы, связанные с обслуживанием ЯРД на испытательных стендах и пусковых площадках.

ЯРД для полёта на Марс. Концептуальная разработка ядерной двигательной энергетической установки для обеспечения марсианской экспедиции является последней по времени, вобравшей в себя весь предшествующий опыт. Установка основана на комбинированном однополостном газофазно-твердофазном реакторе трансформируемой конструкции массой 57,5 т (**Рис.37**). Прототипом устройства является комбинированный газофазно-твердофазный реактор «Лампа». Тепловая мощность реактора 2,14 ГВт. Твердофазные тепловыделяющие сборки (ТфТВС), размещенные по кольцу вокруг центральной полости реактора и снабженные приводными механизмами, обеспечивают необходимый уровень нейтронного потока и критичность при запуске, когда ядерное горючее в полости газофазного твэла отсутствует. По мере подачи и накопления в центральной полости ядерного горючего, т.е. образования плазменной зоны и формирования газофазного твэла, ТфТВС из активной зоны извлекаются, а реактор превращается в газофазовый ядерный реактор.

Благодаря трансформируемой конструкции установка может работать в двух режимах: - двигательном (газофазном) тягой 17 т при удельном импульсе 2000 с - на разгонных и тормозных участках траектории; - энергетическом (твердофазном) с электрической мощностью 200 кВт для обеспечения внутренних нужд космического аппарата без расходования рабочего тела - на маршевом участке траектории. Этот режим обеспечивается замкнутым газотурбинным контуром с гелий-ксеноновой смесью в качестве рабочего тела, преобразованием тепловой энергии в электрическую с КПД 20% и сбросом избыточного тепла через холодильник-излучатель (цикл Брайтона). На двигательном режиме работы электроснабжение обеспечивается встроенным в сопло многополюсным МГД-генератором мощностью 25 МВт с электродами и шинами возбуждения, ориентированными по образующим сопла. Минимизацию массогабаритных характеристик ГФЯР обеспечивают: применение в качестве ядерного горючего ^{233}U ; максимально возможное использование в замедлителе-отражателе реактора металлического, в том числе крупнокристаллического бериллия, а в остальной части - графита; использование для высокотемпературных элементов конструкций рабочей камеры тугоплавких металлов улучшенного изотопного состава, а для силовых корпусов реактора - высокопрочных титановых сплавов и упрочняющих углекомполитов; применение для сильноточных систем магнитной стабилизации, возбуждения МГД-генератора и электропривода насосов гиперпроводящего



алюминия (чистотой 0,9999), допускающего при жидководородном охлаждении плотность тока 100 А/мм^2 при удельном сопротивлении в десятки раз ниже, чем у меди.

Рис.37 ЯРД для полёта на Марс

Понятно, что экстремальные температурные режимы работы многих элементов конструкции ГФЯР и крайне агрессивная среда (расплавленный уран,

водород высокого давления, щелочные металлы) потребовали проведения глубоких материаловедческо-технологических проработок. В результате для системы подачи ядерного горючего были разработаны тугоплавкие сплавы на основе тантала - вольфрама - гафния, а также ниобия. Для некоторых участков стенок рабочей камеры были разработаны пористые тугоплавкие материалы как на основе вольфрама, так и молибдена, а для высокотемпературных фильтроэлементов - никеля и нихрома. Дальнейший анализ выявил исключительную эффективность применения рассмотренного выше ЯРД для марсианского экспедиционного комплекса. При полезной нагрузке 150 т стартовая масса марсианского энергетического комплекса (МЭК) на околоземной орбите составит 520...540 т (в зависимости от даты старта). Для сопоставления можно указать, что в случае применения ЯРД с твердофазным реактором стартовая масса МЭК составляла бы 730:800 т, а с химическим ЖРД - 1700:2500 т.

Кроме основных схем ЯРД – твердо- и газофазных, в 60–80-е годы широко исследовались и другие: с центробежным удержанием топлива (удельный импульс до 11000 м/с), твердофазные на стабильных компонентах топлива и с рабочим телом на основе гидрида лития, газофазные с шестифтористым ураном и др. По каждому из направлений получены ценные материалы, имеющие не только прикладное, но и фундаментальное теоретические и практическое значение. Начатое в середине 70-х годов изучение установок с циркулирующим топливом на основе шестифтористого урана привело к разработке предложений по использованию такой схемы в энергодвигательном комплексе марсианской экспедиции.

В случае полёта на Марс ракеты с ядерным двигателем, запуск реактора будет осуществляться на орбите сборки корабля. До момента старта корабля со сборочной орбиты реактор будет находиться на нулевом уровне мощности, а после выведения реактора на рабочий режим космический аппарат начнет свое ускоренное движение от Земли. При отклонении вектора тяги от расчетного направления предусмотрена возможность отсечения тяги двигателя.