

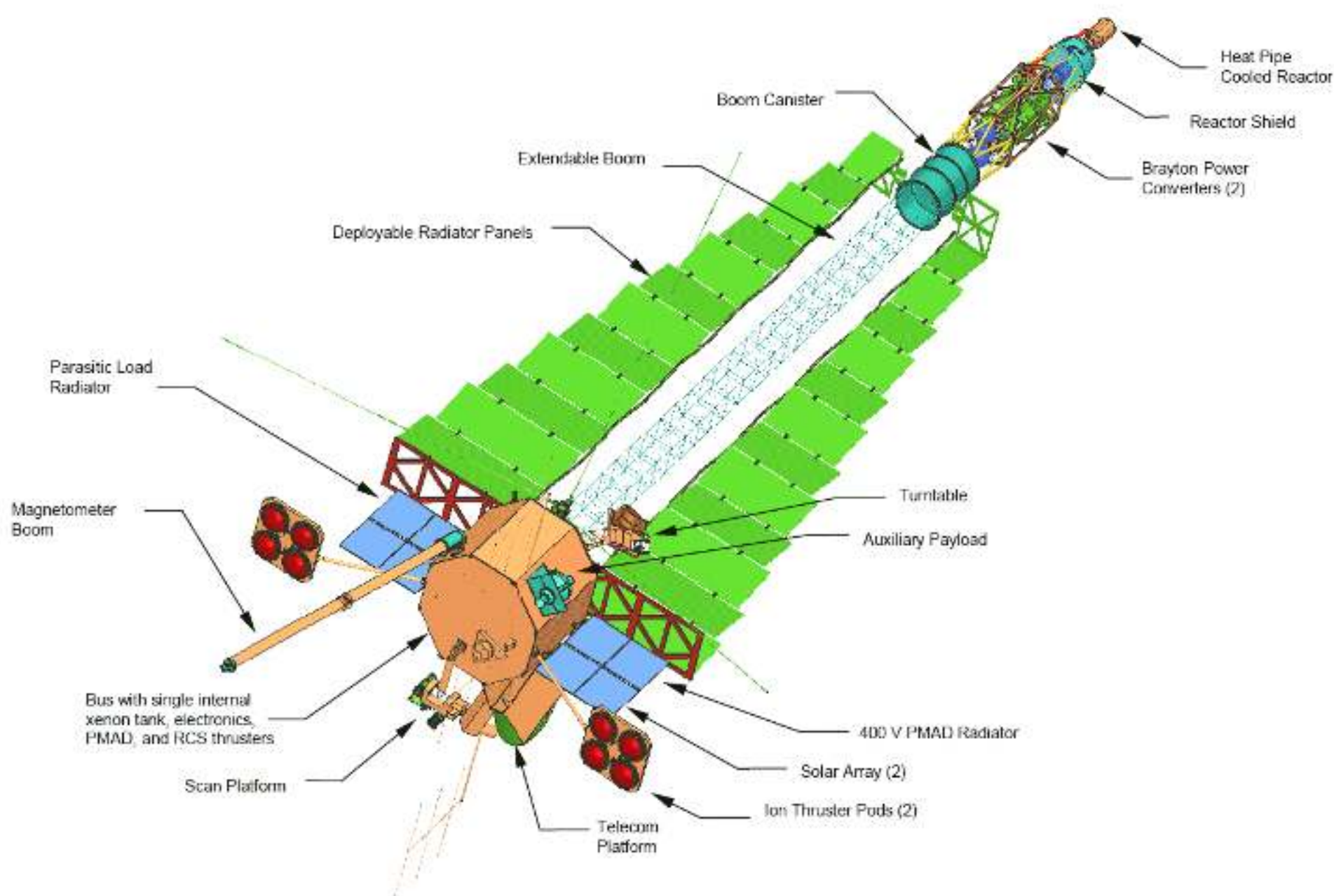
tnenergy 13 июля 2015 в 13:18

# Ядерные реакторы в космосе: ТЭМ

Космонавтика, Физика

Из песочницы

Вершиной 20 летних исследовательских и конструкторских усилий по созданию космических энергоустановок на базе ядерных реакторов в СССР стал полетевшая в 1988 году двойка спутников «Плазма-А». Эти установки базировались на отлаженной на земле технологии термоэмиссионного преобразования энергии (более 80 испытательных сборок провели в реакторах от 100 до 16000 часов). Вложенные усилия, масштаб работ и красота идеи оказались настолько мощными, что последующие 20 лет в статьях профильных организаций, проектировавших и планировавших КА с ЯЭУ вы не найдете ничего, кроме развития идей реакторов с термоэмиссионными преобразователями. 20 лет разговоров про светлое ядерно-космическое будущее оборвались в октябре 2009 года, когда финансирование получили не многочисленные проекты развития «Плазма-А», а «Транспортно-энергетический модуль» с турбомашинным преобразованием. И во главе проекта встали совсем не те люди, которые занимались этой тематикой раньше. Одну из ключевых ролей в таком развороте кроме усилий лоббистов сыграла одна техническая идея, связанная со сбросом тепла в космосе.



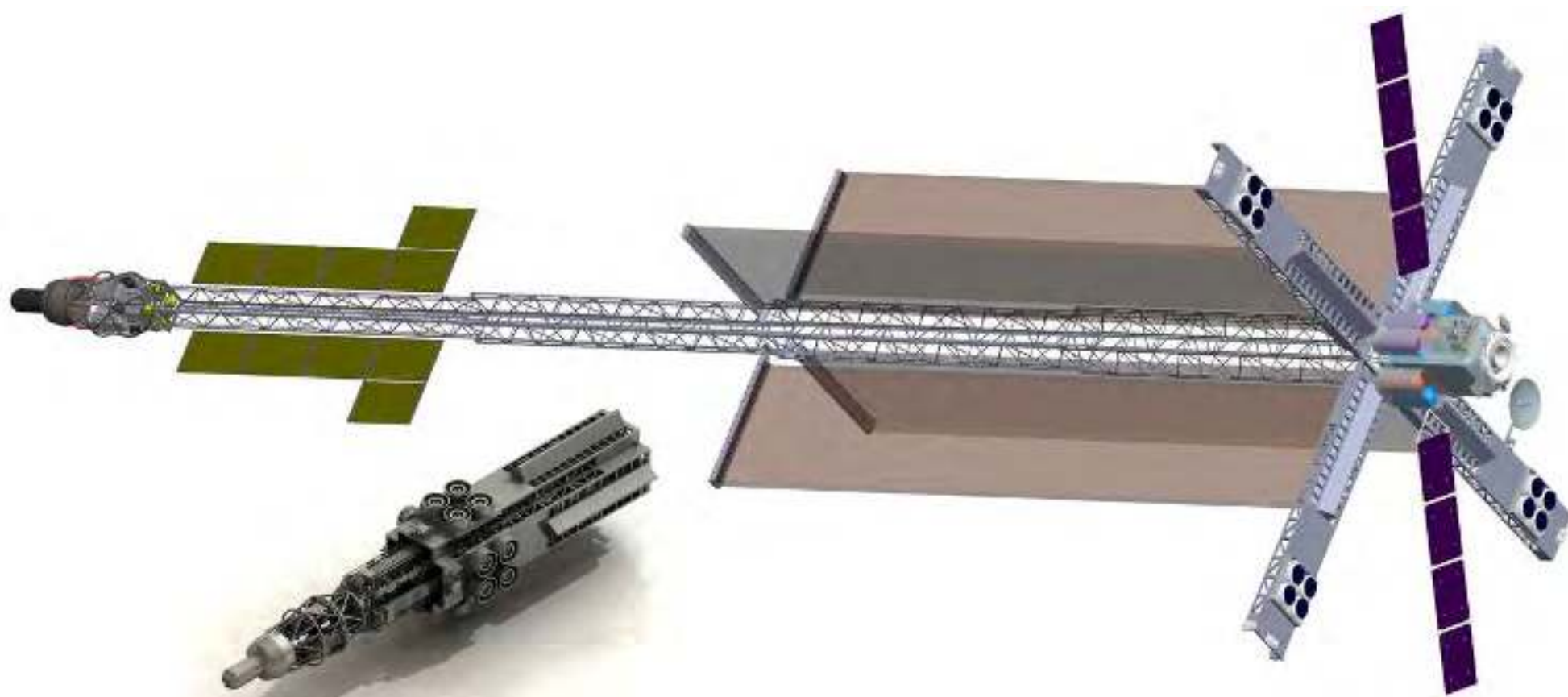
Американская AMC JIMO, т о же планировавшаяся с ядерным реакт ором на борт у

Хорошо известно, что вес — это главный враг космических ЯЭУ, а холодильники для сброса паразитного тепла — самый тяжелый элемент подобных аппаратов. В варианте с термоэмиссионными преобразователями этот вопрос решается довольно элегантно — да, их КПД невелик по сравнению с турбинным циклом, но температура холодильников излучателей может быть очень высока (порядка 1000K, а сам реактор разогрет до 1650K), а как мы помним, вес холодильников зависит от температуры в степени  $1/T^4$ . В итоге эта степенная зависимость переигрывает вчетверо больший объем тепла, который надо сбросить с термоэмиссионной ЯЭУ. Только если у вас нет революционной идеи [капельного ХИ](#).

Идея заключается в том, что бы вместо того, что бы гонять жидкость по трубкам внутри излучающих панелей, она полетит прямо сквозь космос — от форсунок-формирователей струй до каплеуловителя. При этом, теоретически, вес ХИ можно сократить в разы, а потери на испарение в вакуум решаются подбором специальной кремнеорганической жидкости. В таком раскладе у термоэмиссионных ЯЭУ начинает играть их «родимое пятно» — невысокая плотность мощности на электрогенерирующих твэлах, ну и кпд в 5-8%.



Именно такой концепт ТЭМ — с турбомашинным преобразованием тепловой энергии и капельными холодильниками был предложен ФГУП «Центр Келдыша» в 2009 году. Новаторство идеи легло на благодатную почву пика «развития инноваций в стране» президентом Медведевым, а помноженное на силу лоббистов Росатома и главы «ИЦ Келдыша» академика Коротеева позволило смести жалкие «архаичные» проекты РКК Энергии, КБ Арсенал, ОАО «Красная звезда» с доски и получить заветное финансирование.



Первый эскизный вариант ТЭМ с 4 капельными холодильниками (бежево-коричневые полост нища). Снизу рендер в сложенном положении. (с) РКК Энергия

Для проведения НИОКР в 2010 году была начата программа стоимостью 17 миллиардов рублей, из которых 7.245 млрд руб выделялось на реактор, 3.955 на систему преобразования энергии, а около 5,8 млрд — на оставшийся космический аппарат. Ядерный реактор поручили делать институту НИКИЭТ (создателю свинцового быстрого БРЕСТ), систему преобразования энергии — ИЦ им. Келдыша, а весь космический аппарат — РКК «Энергия».

Облик первой редакции ТЭМ поражал любого инженера, знающего контекст. Сверхвысокотемпературный (1600K!) быстрый реактор, охлаждаемый газом, топливо из карбонитрида урана (перспективное, но малоизученное), турбокомпрессорные установки, работающие на 60000 оборотах в минуту с температурой на турбине 1500K непрерывно 10 лет, теплообменники, на те же 1500K. Раздвигающаяся конструкция аппарата длиной 54 метра и шириной 20, в исходном состоянии укладывающаяся под обтекателем РН. Рекордная мегаваттная космическая электросистема с напряжением 4,5 киловольт, питающая 16 ионных ЭРД мощностью по 60 киловатт (в 10 раз мощнее летавших на тот момент и в 1,5 раза мощнее лабораторных рекорсменов). Наконец сам космический аппарат, который должен был выдерживать в 10 раз большую дозу облучения, чем сегодняшний типичный уровень в 100 килорад — облучения как от реактора, так и от радиационных поясов, сквозь которые пришлось бы буксировать полезные нагрузки.



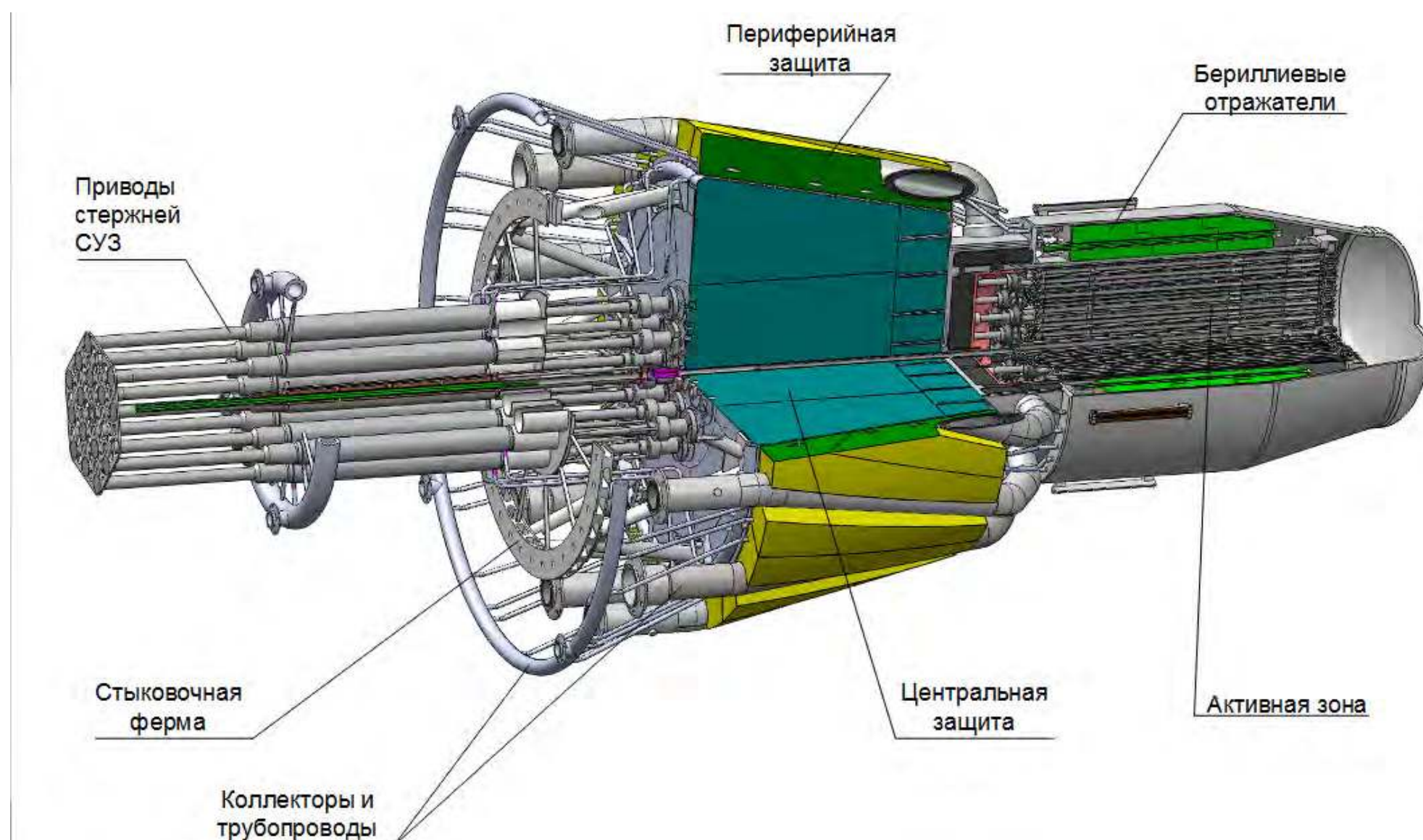
Плакат ТЭМ на МАКС-2013. За ядерным блоком слева и справа видны две основные концепции — с капельными и панельными ХИ



Проект начал развиваться, регулярно блистая перспективами и инновациями в интервью, ТВ и конференциях. Наиболее резво взялся за работу Росатом — быстро отказавшись от карбонитридного топлива в пользу знакомого оксидного был спроектирован ядерный реактор, смесь стандартного и нового. В цилиндрическом корпусе из нержавеющей стали диаметром 50 см и длиной примерно метр расположены несколько сотен цилиндрических твэлов, содержащих оксид высокообогащенного урана в оболочках из монокристаллического молибдена диаметром 4-5 мм. Общая расчетная масса топлива 80-150 кг, в зависимости от достижимого выгорания. Управление осуществляется продвижением и выдвиганием 19 поглощающих стержней системы управления из карбида бора в молибденовой оболочке. Быстрый реактор имеет тепловую мощность 3,8 мегаватта и охлаждается газовой смесью из 78% гелия и 22% ксенона при рабочем давлении в 40 атм. Температура газовой смеси на входе 1200, а на выходе 1500K (1227 C).

Модель активной зоны ТЭМ для гидравлических испытаний. Проект им НИКИЭТ за плохое качество довольно уникального изображения

Ядерную установку разрабатывает несколько предприятий Росатома, в т.ч. ФЭИ, много десятилетий занимавшийся разработкой космических ЯЭУ, НПО «Луч», владеющий технологиями высокотемпературных твэлов, а внутриреакторное поведение элементов ЯЭУ ТЭМ в петле с горячей рабочей газовой смесью вел НИИАР, обладающий самым большим парком исследовательских реакторов в стране. Не смотря на уход с битьем посуды из НИКИЭТ в 2012 году главного конструктора реактора В.П. Сметанникова разработка реактора продолжается практически в графике — испытана петля с новым для ядерщиков теплоносителем и штатным твэлом, создан частичный теплогидравлический стенд, а в НИТИ в Сосновом Бору строится наземный образец ЯЭУ. Запуск этой установки планируется на 2015 год, и такой запуск будет безусловной победой ядерной инженерной науки.



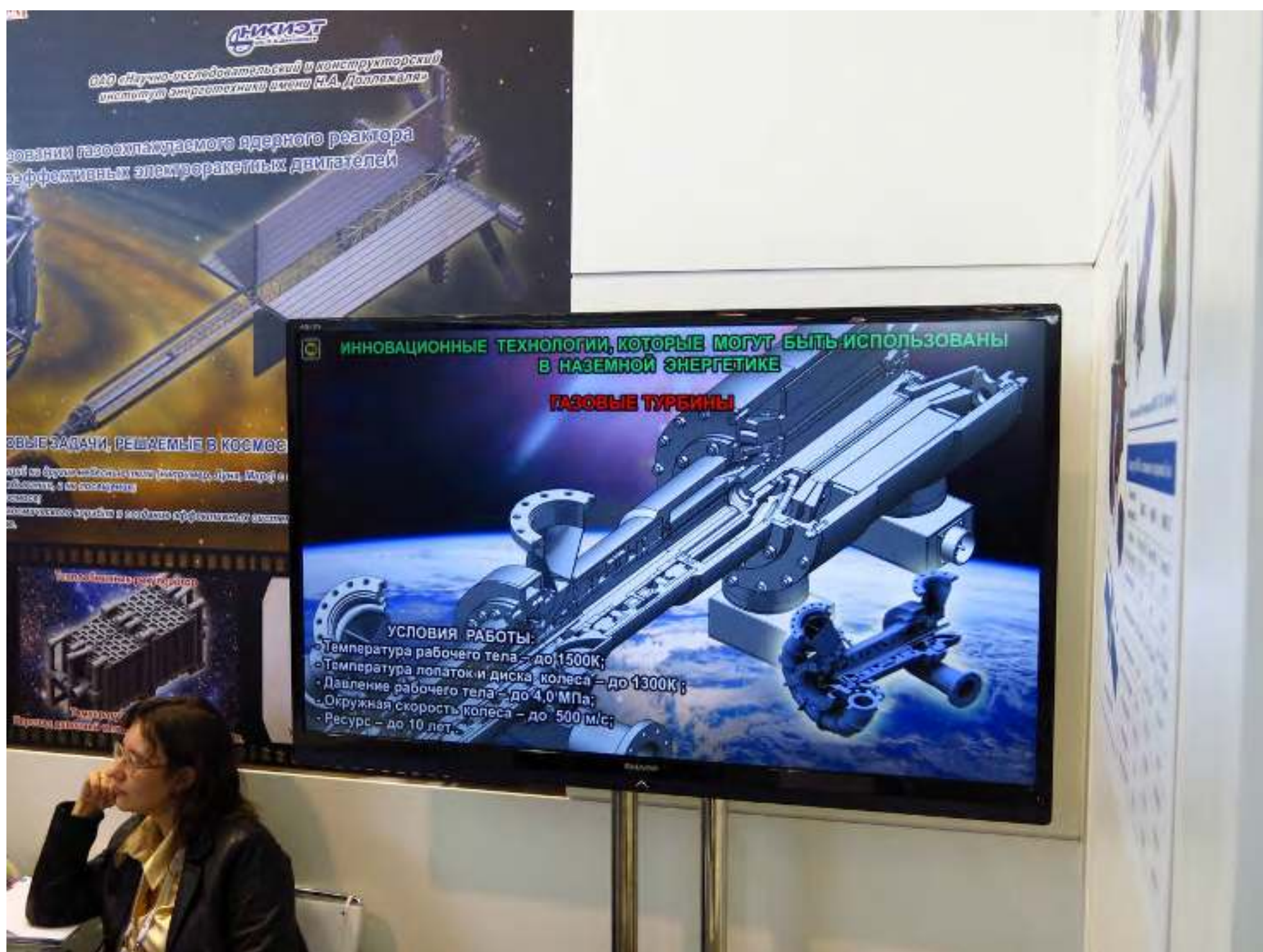
Ранняя версия реактора РУГК для ЯЭУ ТЭМ. (с) Росатом

Другая кооперация из ИЦ им. Келдыша, КБХМ, КБХА и ВНИИЭМ занималась турбомашинным преобразователем. На ТЭМ планируется установить 4 одинаковых модуля мощностью по 250 киловатт. В систему входят так же AC/DC и DC/DC преобразователи, буферные аккумуляторы, дополнительные системы охлаждения оборудования. Вместе с ядерным реактором масса энергоблока должна была составить 6800 кг.





Схема и параметры ЯЭДУ ТЭМ. (с) Центр Келдыша

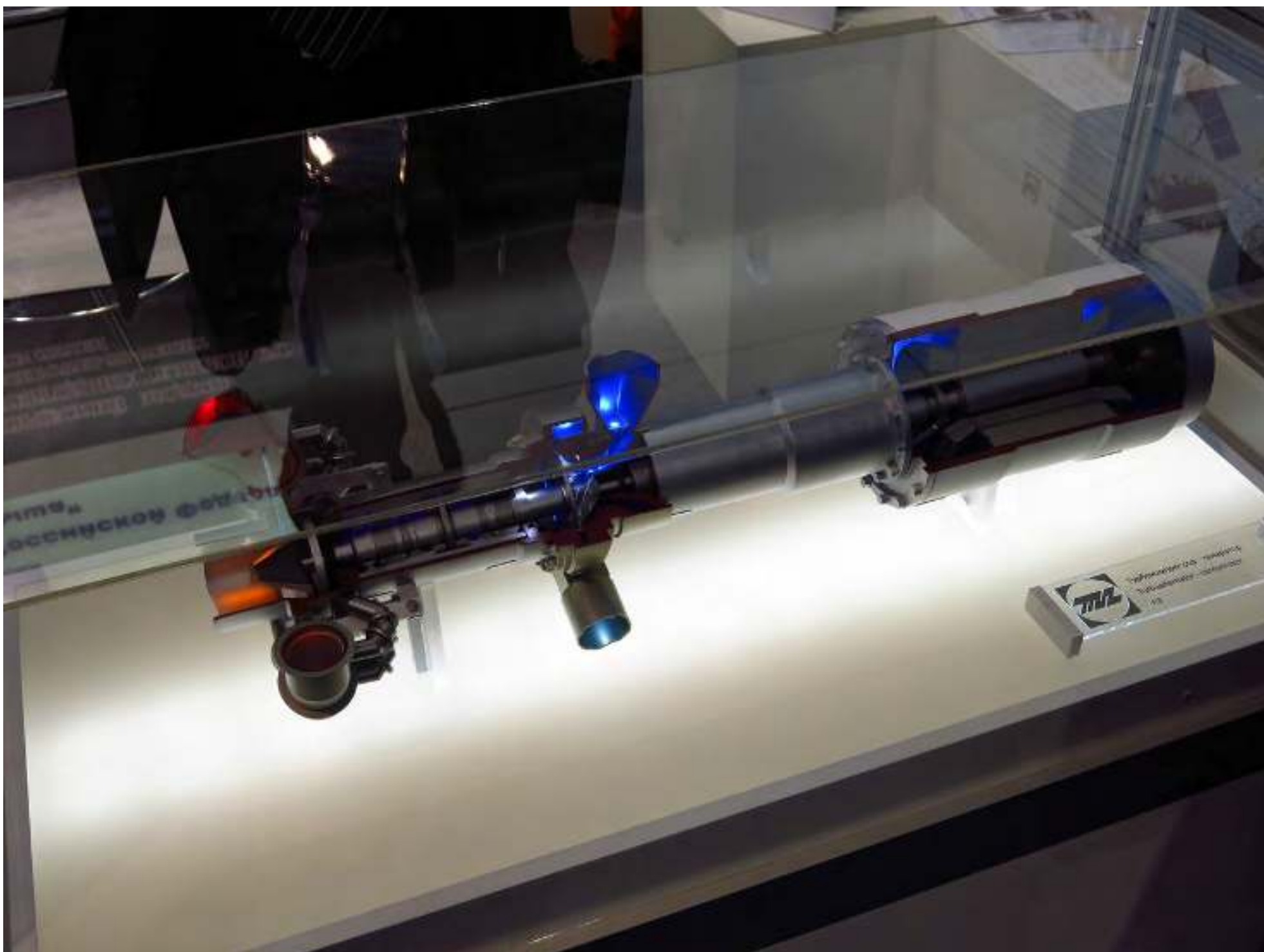


Кадр из ролика Центра им. Келдыша с разрезом 250-киловаттного турбогенератора ТЭМ. (с) А. Ильин

Тепловая энергия превращается в электрическую в газотурбинном цикле (Брайтона), где энергия газа, извлеченная на турбине



идет как на электрический генератор, так и на вращение компрессора, поддерживающего циркуляцию газа. Через теплообменник остаточное тепло сбрасывается во второй контур, где рассеивается в космос с помощью холодильников-излучателей.



Модель 250 кВт турбогенератора ТЭМ 1:2 (с) Аник

Сложности по разработке элементов системы турбомашинного преобразования сравнимы со сложностью реактора. По отдельности все требования выполнимы: существуют газовые турбины и на большие, чем 1500K температуры, а турбонасосы ракетных двигателей, перекачивающие водород, имеют частоты вращения и окружные скорости даже выше, чем 60000 и 500 м/с. Однако собрать все сразу в сочетании с 10 летним необслуживаемым ресурсом — прыжок был явно выше головы. Например, проблемы с высокотемпературными газовыми теплообменниками в свое время зарубили очень перспективное направление регенеративных газотурбинных двигателей, а газодинамические подшипники для невесомости довольно сложно испытывать на ресурс в условиях гравитации.



Пластини опытного теплообменника ТЭМ. (с) А. Ильин

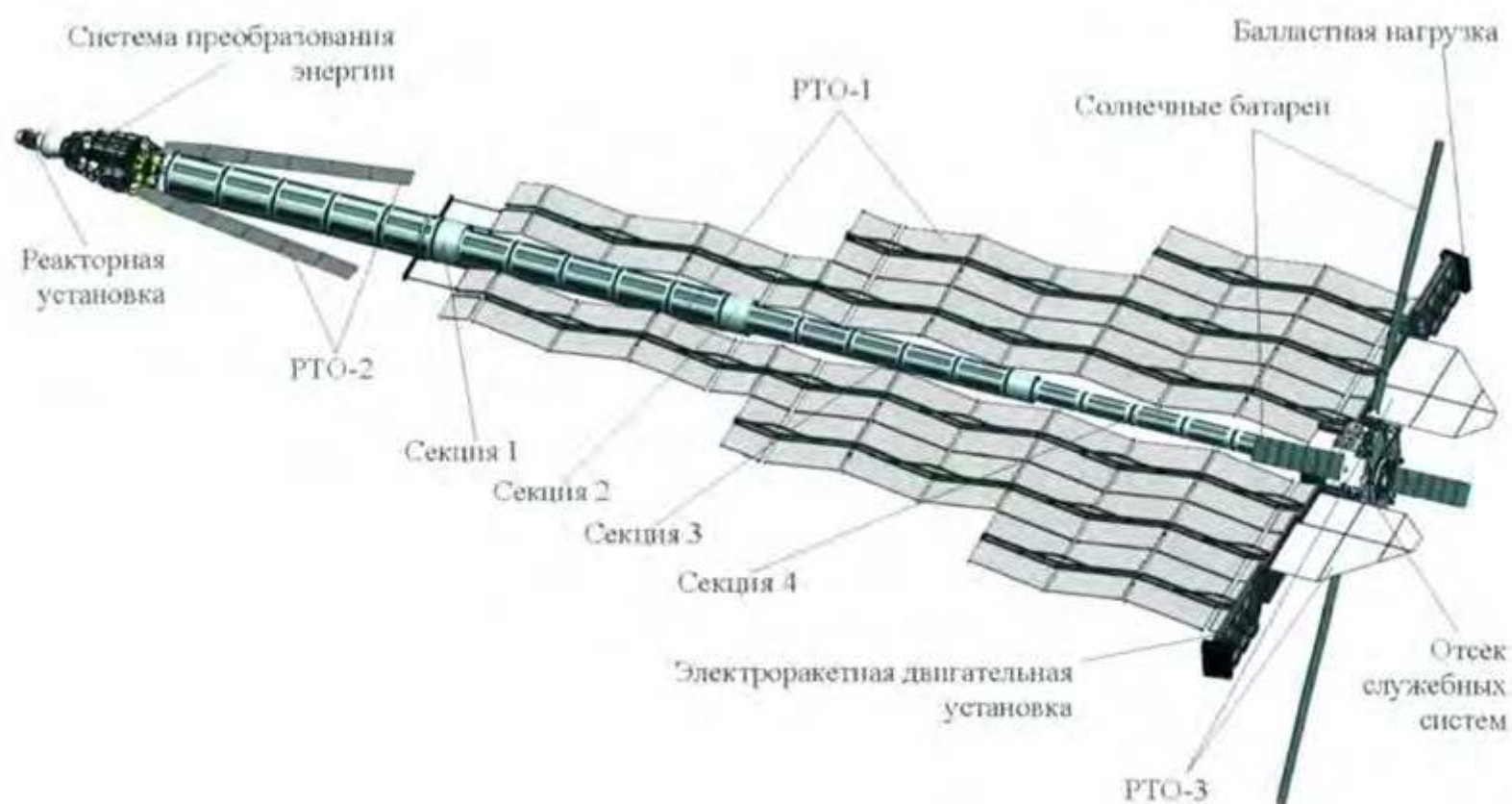
В 2013 году ИЦ им. Келдыша рапортовал об успехах по созданию прототипов всех важнейших элементов турбомашинного преобразователя — двух типов теплообменников, генератора и газотурбинной установки. Однако по последним данным НИР идут довольно туго и ресурс оборудования далек от нужного. Уже осенью 2013 постулируется факт, что капельные холодильники далековаты от инженерного воплощения, и разработать их пока не получится. Обещанные рекордные ионные ЭРД постепенно мельчают — проблемы с большеразмерными перфорированными электродами с высоким ресурсом, которые не умеет решать никто в мире остаются нерешенными.





Прототип ионного двигателя ТЭМ от Центра Келдыша. Уже помельчавших в размерах по сравнению с изначальной задумкой  
© А. Ильин



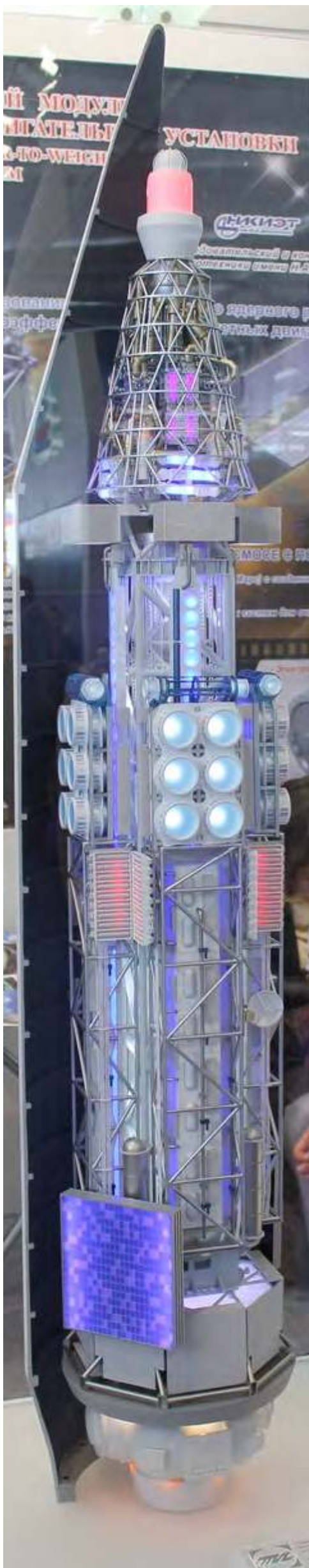


Общий вид ТЭМ-1 в рабочем положении

Вариант ТЭМ с панельными холодильниками

Кроме того, взаимодействие Центра Келдыша (входящего в Роскосмос), возглавляемого академиком Коротеевым с остальными крупными космическими предприятиями зачастую носит натянутый характер с взаимным поливанием грязью, что тоже не способствует прогрессу. ТЭМ, красиво расписанный на этапе эскизного проекта начинает рассыпаться на этапе подтверждения характеристик агрегатов.





Модель сложеного ТЭМ, лет о 2013 года. Обрат ит е внимание на ионные двигат ели — их ст ало 24 прот ив 15 на ранней модели. Холодильники все еще капельные

Наконец, работа предприятий во главе с РКК “Энергия” была направлена на создание собственно космического аппарата, вооруженного ядерным энергоисточником. “Энергия” вынуждена была взяться за фронт работы, который перекрывал путь ее собственной разработке буксира с термоэмиссионной ЯЭУ “Геркулес”, да и фронт проблем был шире чем у двух других основных “головняков”. Необходимо было создать тяжелый КА, имеющий на борту все традиционные элементы — системы ориентации и орбитального маневрирования на гидразиновых ЖРД, мощные солнечные батареи и телеметрию, системы причаливания к полезной нагрузке и заправки, ксеноновые баки и наконец заставить это все работать 10 лет в радиационных условиях. Еще более специфическими элементами должны были стать:

— раскладывающиеся фермы для выноса ЯЭУ от тела КА, с удлинением в космосе в 2,5 раза, с 20 до 54 метров;

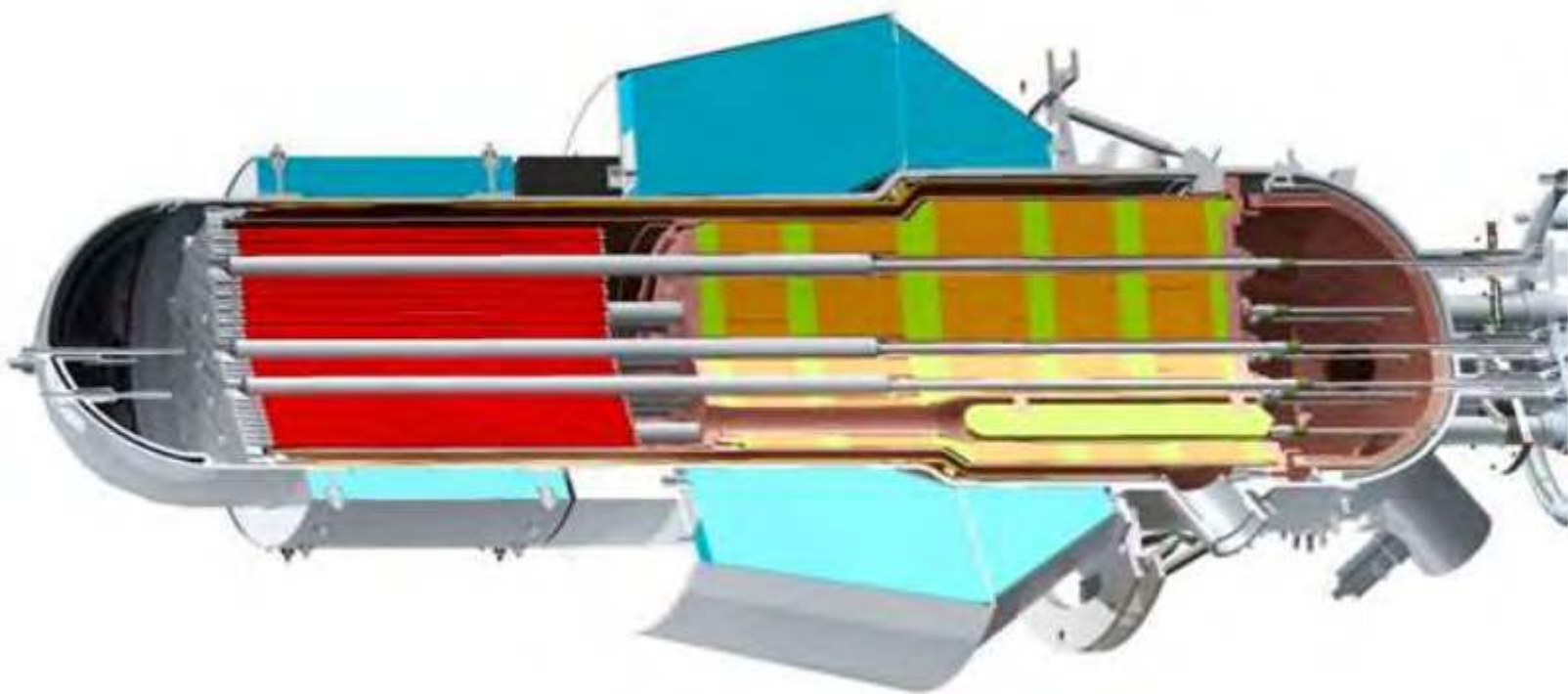


- раздвигающиеся трубопроводы теплоносителя их герметизация — все это должно безотказно работать в условиях вакуума и радиации;
- раскладывающиеся панели ХИ площадью в сотни квадратных метров;
- высоковольтные линии запитки ЭРД;
- раскладывающиеся крылья, несущие ЭРД и холодильники-излучатели.



Эскизный проект ТЭМ в предст авлении РКК-Энергия

Все это великолепие требовалось упижать в максимальные 22 тонны, которые способна выводить РН «Ангара-5». Фактически, сразу после выдачи эскиза будущего ТЭМ РКК «Энергия» начинает усиленно отгребать от проекта ТЭМ, скинув часть задач на ГКНПЦ им. Хруничева, а часть — на КБ Арсенал — создателей КА «УС-А» и «Плазма-А». Представители РКК начинают рассказывать в интервью, что буксиры на базе СБ не так и плохи. Арсенал, в свою очередь сдувает пыль со своих проектов буксиров с 300-500 кВт термоэмиссионной ЯЭУ.



Разрез реакт ора ТЭМ в версии т ехнического проект а. (с) НИКИЭТ

В конце 2014 года сложная ситуация с проектом выливается в его секвестирование в рамках Федеральной космической программы на «2016-2025». В ней остается финансирование на НИР, причем в основном по линии, где есть какие-то результаты — собственно ядерный реактор и турбомашинные преобразователи. Космический запуск ТЭМ убирается из планов, и мы видим, как будущее, в котором у человечества появляются новые инструменты для освоения космоса тает, как на фотографиях в «Назад в будущее». В очередной раз, как в случае с «Геркулесом» или JIMO человечество откатывается назад, не в силах преодолеть технический барьер на пути к созданию мощных космических реакторов.



Теги: [космос](#), [ядерные реакторы](#)

↑

+41

↓

🔖


60

👁

31,1k

💬

26



243,5

Карма

91,5

Рейтинг

316

Подписчики

Валентин

@tnenergy

Пользователь

## Комментарии 26



tnenergy 13 июля 2015 в 14:10

🔖

🔖

↑

0

↓

Прошу простить меня за то, что я уже опубликовал этот текст в своем блоге — в какой-то момент ожидания показалось, что модерацию здесь оно не пройдет никогда, и жаль было лишать других читателей этой статьи.



Iaxmer 13 июля 2015 в 14:12

🔖

🔖

↑

+2

↓

Залейте картинки на хабрасторадж, пожалуйста. Ибо 503.



MaxAlekseev 13 июля 2015 в 14:38

🔖


🔖

↑

+2

↓

Можно подробнее раскрыть принцип действия капельного холодильника?



tnenergy 13 июля 2015 в 15:46

🔖

🔖

↩

↩

↑

+1

↓

Ну представьте себе форсунку с пьезо-пищалкой, которая разбивает струю жидкости на равномерный поток капелек диаметром эдак 0,5 мм. Теперь из таких форсунок наберите линию, которая будет создавать «полотнище» летящих капелек. Дальше капли попадают в уловитель, и возвращаются насосом к форсункам.

Тепло передается в жидкость до генератора капель, и излучается в пространство во время их полета.



MaxAlekseev 13 июля 2015 в 15:52

🔖

🔖

↩


↩

↑

+2

↓

А как тогда маневры/торможение аппарата, часть капель будет не попадать в каплеуловители или же охлаждающая жидкость в каком то смысле расходник который периодически будут доливать.



tnenergy 13 июля 2015 в 16:17

🔖

🔖

↩

↩

↑

0

↓

Ну, динамику можно прикинуть. А жидкость будет теряться, да, в т.ч. на испарение, как не крути. У ТЭМ она планировалась одной из заправляемых жидкостей.



Psionic 14 июля 2015 в 11:07

🔖

🔖

↩


↩

↑

0

↓

А пардон, а потери от улета капелек в космос какие? И как сможет перекачивать насос жидкость из среды где давление ноль, в среду трубопровода на форсунки где давление выше?



mattheus 13 июля 2015 в 17:13

🔖

🔖

↑

+2

↓

Подскажите для каких целей разрабатывается космический буксир весом 22 тонны на ионных двигателях и с такой мощной силовой установкой? Что, откуда и куда он будет буксировать в течение 10 лет? На какую орбиту может его вывести Ангара-5? На какой орбите планируется эксплуатация полезной нагрузки? Если он вести 22 тонны и Ангара-5 выводит 22 тонны, то что он будет буксировать, ведь он сам является всей полезной нагрузкой Анагры-5?



kibitzer 13 июля 2015 в 18:49

🔖

🔖

↩

↩

↑

0

↓

Одна Ангара выводит буксир, другая — полезную нагрузку для буксира.

Использование: исследование солнечной системы, доставка грузов на орбиту Марса (может сделать несколько рейсов, учитывая 10 летний срок эксплуатации).

Понятно, что финансирование на такие проекты будет сокращаться, в период кризиса, хорошо, что НИР оставили.



tnenergy 13 июля 2015 в 20:27

#

🔖

🔗

👤

↑ 0 ↓

На самом деле, не думаю, что кто-то серьезно проектировал ПН для ТЭМ, но говорили, что в ТТЗ были определенные массы для выведения на ГСО и в точки либрации Земли(!), учитывая, что это скорее речь про военных — совершенно непредставимо, что это могло быть.

Ангара может вывести такую ПН на весьма невысокую опорную орбиту, откуда ТЭМ сам должен дать импульс довыведения до орбиты 800x800 км, где уже произвести запуск реактора и дальше перемещаться своими ионниками.

На остальные вопросы вам вроде ответили уже.

ZloAlien 13 июля 2015 в 22:25

#

🔖

🔗

👤

↑ -5 ↓

Силовая установка нужна что бы можно было из космоса выжечь что-нибудь нецензурное на лужайке белого дома. :)

ZloAlien 13 июля 2015 в 17:22

#

🔖

🔗

👤

↑ 0 ↓

Интересно было бы в холодильнике капли пускать по леске (или по очень пористому материалу) — что бы они за леску держались за счёт поверхностного натяжения. К метеоритам устойчивость уменьшится, но точность изготовления распылителей не так важна станет.

mattheus 13 июля 2015 в 19:29

#

🔖

🔗

👤

↑ +1 ↓

А за счет чего капля по леске будет двигаться, если гравитации нет? Даже если ей придать начальный импульс, он быстро погасится силами поверхностного натяжения, которые держат каплю на леске.

ZloAlien 13 июля 2015 в 22:18

#

🔖

🔗

👤

↑ -1 ↓

Так там же вроде бы полёт осуществляется, а значит тяга есть — вот она тянуть каплю и будет. И можно вообще не каплю, а струю использовать — поверхность струны жидкостью обволакиваться будет (с одной стороны жидкость подливать на струну, а с другой откачивать).

Javian 13 июля 2015 в 20:22

#

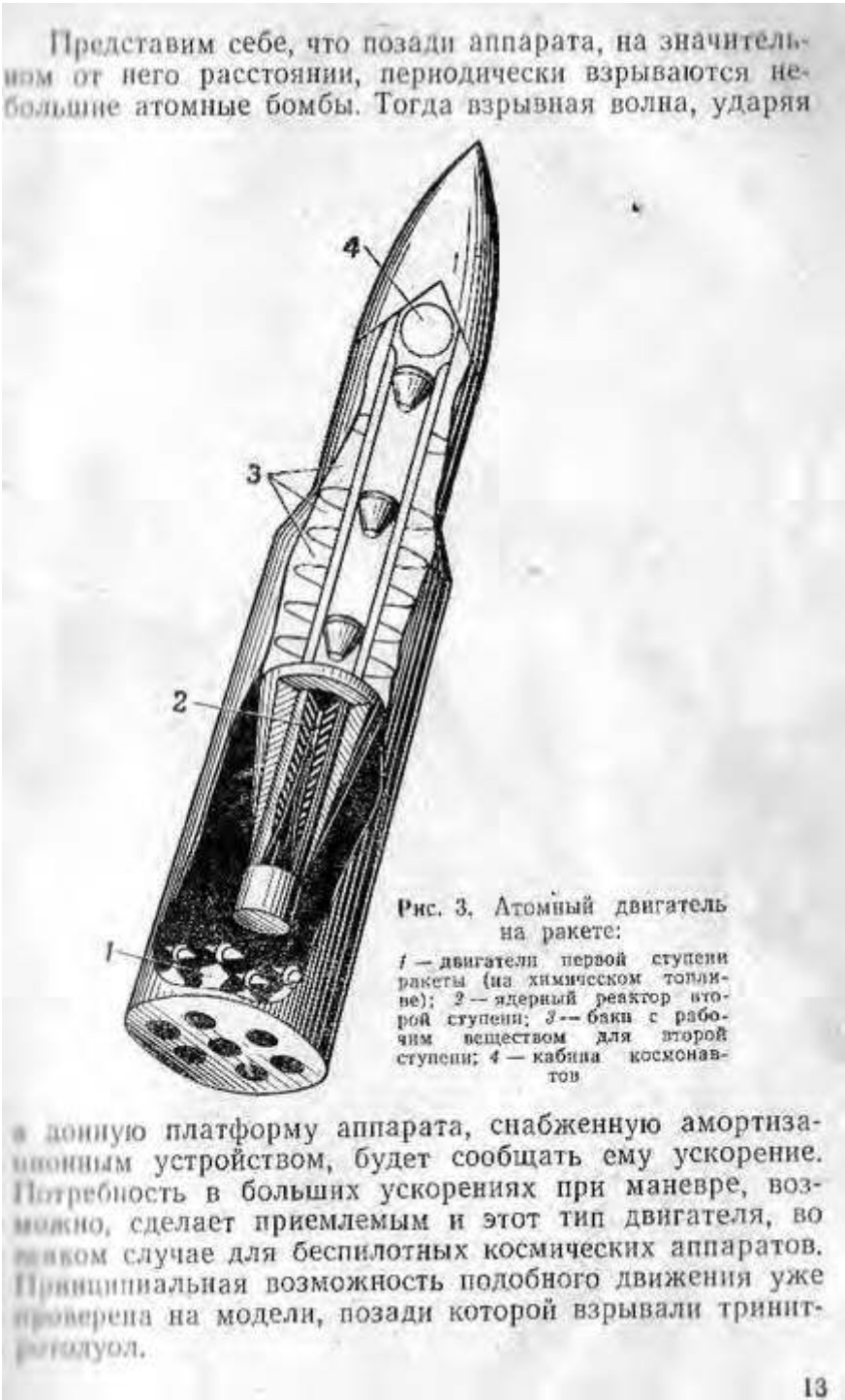
🔖

🔗

👤

↑ 0 ↓

Были еще варианты использования ядерного топлива:



tnenergy 13 июля 2015 в 20:24

#

🔖

🔗

👤

↑ +2 ↓

Кстати, этот тип ЛА имеет шутовское название «взрыволеты».

 kibitzer 13 июля 2015 в 20:29

#

🔖

↑ +6 ↓

Даже сложно представить, на что могло бы быть способно человечество, если объединилось и не тратило силы на всякие тупиковые вещи (начиная от военных конфликтов, заканчивая высокочастотным трейдингом и криптовалютами).

Прямо обидно за нас, за людей.

 Doktor\_Gradus 13 июля 2015 в 22:38

#

🔖

📄

👤

↑ +1 ↓

Подозреваю, что вы тоже могли бы тратить 24 часа своих суток на работу. Сколько смогли бы достичь!

 bachin 14 июля 2015 в 12:16

#

🔖

📄

👤

↑ -1 ↓

Очень быстро бы размножилось и вымерло от недостатка кормовой базы.

 ToSHiC 14 июля 2015 в 00:04

#

🔖

↑ 0 ↓

На такой штуке уже можно делать нормальные экспедиции на Марс. В связи с этим вопрос: могут ли принципиально вышеописанные реакторы работать на поверхности планеты, не будет ли им мешать сила тяжести? Ведь главная проблема колонии на другой планете (после появления возможности вернуться обратно на Землю) — это недостаток энергии. Если аккуратненько приземлить туда реактор и заставить работать, то это будет существенным подспорьем. Охлаждать, наверное, вполне можно нагревая грунт, турбины тоже можно попроще и потяжелее поставить.

 tnenergy 14 июля 2015 в 01:06

#

🔖

📄

👤

↑ 0 ↓

Конкретно вот этот реактор не очень приспособлен для работы на поверхности (конструктивно и т.з. радиационной защиты окружающих), но разработчики космических реакторов (по сути их 3 в мире — НИКИЭТ, ФЭИ и Idaho National Lab) регулярно показывают концепты для работы на разных планетах/лунах.

 kumbr\_87 14 июля 2015 в 09:28

#

🔖

↑ 0 ↓

Если я правильно посчитал из последней таблицы:  
масса 20290, допустим еще 2000кг полезной нагрузки.  
Тяга не меньше 18 Н в течении 10 лет.  
Итого ускорение придаваемое аппарату будет равно  $a=F/m=18/22290=0.000808\text{ м/с}^2$   
Т.е. через 10 лет скорость аппарата увеличится на  $a*t=0.000808*10*24*365*3600=254664$  т.е. около 255 км/секунду.  
Т.е. если бы такой агрегат пустили сейчас то с полезной нагрузкой в 2 тонны он бы имел возможность обогнать новые горизонты в течении пары лет и еще через месяц другой — вояджеры?

 tnenergy 14 июля 2015 в 10:28

#

🔖

📄

👤

↑ 0 ↓

Да, такой бы аппарат можно было послать, например в гравитационный фокус Солнца ~ 600 а.е., ну т.е. он бы долетел туда за приемлемое время.

 Yakimchuk 14 июля 2015 в 11:44

#

🔖

↑ 0 ↓

Я правильно понимаю, что в качестве орбитального буксира около земли он не применим? Расчистить ГСО или наоборот на неё что-то вывести? Или ионники позволяют ему многократно маневрировать?

НЛО прилетело и опубликовало эту надпись здесь

 Yakimchuk 14 июля 2015 в 12:33

#

🔖

📄

👤

↑ 0 ↓

Хорошо. Создалось впечатление, что смысл в его использовании только для дальних полётов.