

For participants only
25 November 2005

Russian
Original: English

**Комитет по использованию космического
пространства в мирных целях**
Научно–технический подкомитет
Сорок третья сессия
Вена, 20 февраля – 3 марта 2006 года
Пункт 9 предварительной повестки дня*
**Использование ядерных источников энергии в
космическом пространстве**

**Совместный технический практикум Организации
Объединенных Наций/Международного агентства
по атомной энергии по целям, сфере охвата и общим
параметрам возможных технических норм безопасности
использования ядерных источников энергии
в космическом пространстве
(Вена, 20–22 февраля 2006 года)**

**Положение дел и потребности в области обеспечения
ядерной безопасности в космическом пространстве:
точка зрения проектировщиков**

Рабочий документ, представленный Францией

Записка Секретариата

1. В соответствии с пунктом 16 резолюции 60/99 Генеральной Ассамблеи от 8 декабря 2005 года Научно–технический подкомитет Комитета по использованию космического пространства в мирных целях организует совместно с Международным агентством по атомной энергии технический практикум по целям, сфере охвата и общим параметрам возможных технических норм безопасности использования ядерных источников энергии в космическом пространстве, который будет проведен в Вене 20–22 февраля 2006 года.

* A/AC.105/C.1/L.283.



2. В приложении I к настоящему документу содержится рабочий документ, подготовленный для совместного технического практикума в соответствии с ориентировочным графиком работы по организации практикума, который был согласован Рабочей группой по использованию ядерных источников энергии в космическом пространстве в ходе межсессионного совещания, проведенного в Вене 13–15 июня 2005 года (A/AC.105/L.260).

Приложение

Положение дел и потребности в области обеспечения ядерной безопасности в космическом пространстве: точка зрения проектировщиков

Рабочий документ, представленный Францией

I. Положение дел и контекст

1. По всей вероятности, в ближайшем будущем новые инициативы будут предусматривать использование различных ядерных энергетических и двигательных установок. Важно отметить, что в случае широкого использования ядерной энергии для гражданских прикладных программ многие страны будут обеспокоены возможной радиологической угрозой. К сожалению, опыт действительно указывает на то, что многие страны опасаются трансграничных последствий аварий космических аппаратов с ядерными установками на борту. В качестве примеров можно привести аварии, связанные с ядерной энергетической установкой SNAP-9A (рассеяние 1 килограмма (кг) плутония (Pu)-238, активностью 17 килоюри (кКи)), реактором спутника "Космос-954" в 1978 году (северная часть Канады, загрязнение площади 50 000 квадратных километров, более 4 000 фрагментов, общий запас активности 85 кКи, собрано 50 Ки) и реактором спутника "Космос-1402" в 1983 году (Индийский океан). Более того, потенциальная опасность все еще существует, например, в связи с недавним полетом космического аппарата "Кассини-Гюйгенс", успеху которого способствовало использование трех радиоизотопных термоэлектрических генераторов (РТГ), содержащих 28,5 кг плутония-238 с активностью 0,5 мегакюри (МКи).

2. Следует подчеркнуть также, что, учитывая общее количество уже запущенных ядерных энергетических установок (ЯЭУ), вероятность аварий ЯЭУ составляет 10^{-4} на установку в год. Хотя это значение неприменимо к большому числу установок, его можно сопоставить с вероятностью в 10^{-6} – максимально допустимым в настоящее время значением частоты повреждения активной зоны на реактор в год на наземных электростанциях. Это указывает на важность и оправдывает необходимость осуществления всеобъемлющей и продуманной программы обеспечения ядерной безопасности применительно к космическому пространству.

3. Принимая во внимание вышеизложенное, при проектировании всех космических ядерных систем необходимо обязательно учитывать требования безопасности. Аспекты безопасности (анализ и испытания) фактически всегда составляли в прошлом важную часть проектов и программ (например, SP100, "Топаз" и Nerva). Однако такой анализ вопросов безопасности проводился не в каких-либо международных рамках, а на основе целей обеспечения безопасности, устанавливаемых каждой из ядерных космических программ. Большинство решений, касающихся наземной ядерной энергетики, принимается на национальном уровне, однако в случае применения ядерной энергии в космическом пространстве явно должны учитываться международные интересы.

4. Предварительный общий подход к этой проблеме, предложенный Комитетом по использованию космического пространства в мирных целях, отражен в резолюции Генеральной Ассамблеи, которая была принята в 1992 году. При том, что в этой первой резолюции можно выделить ряд важных положений, например, запрещение использования в космических реакторах изотопа плутония-239, следует признать, что она охватывает не все стороны проблемы (например, ядерные двигательные установки) и не имеет реальной обязательной силы. Кроме того, не определены международные количественные критерии обеспечения безопасности и использования ядерной энергии в космическом пространстве, вместо которых Комитет дает рекомендации относительно формулирования целей обеспечения безопасности для решения этой важной проблемы.

5. Комплексные программы обеспечения безопасности, которые были разработаны для проектов в прошлом, способствовали формированию политики и подхода в этой области и составляют своего рода общую культуру ядерной безопасности в космосе. Что касается наземных электростанций, то основой философии безопасности является максимальное снижение уровней риска, насколько это разумно достижимо^{a, b}. Исходя из принципа глубокой обороны (понятие линий обороны, многочисленных барьеров и т.д.), цели безопасности определяются таким образом, чтобы гарантировать здоровье населения и защиту окружающей среды. Установление целей безопасности должно содействовать снижению риска (частота \times последствия), если это практически достижимо, до нулевого уровня с помощью технических и экономических средств.

II. Применение ядерной энергии в космонавтике и естественная окружающая среда

6. Во-первых, следует отметить, что все цели безопасности, касающиеся энергетических установок, определялись исходя из естественного и искусственного (медицинского) радиоактивного фона, действующего на организм человека. Следует подчеркнуть также, что естественная космическая среда является очень агрессивной в плане излучения (радиационный пояс Ван-Аллена, галактические космические лучи, всплески солнечных космических лучей и т.д.). Это означает, что цели обеспечения безопасности вдали от Земли должны быть адаптированы к таким факторам, как отсутствие людей и разнообразие естественного фона. В этой связи возникает также вопрос о том, какие предельно допустимые дозы или минимальную величину выброса следует использовать при оценке вероятности аварии, а также о том, какие максимально допустимые дозы должны применяться при штатных условиях эксплуатации. Это касается:

а) радиоактивного выброса термоэмиссионных ядерных двигательных установок (ТЯДУ), для которых с точки зрения безопасности приемлемые уровни топливной эрозии и температурный режим должны определяться с учетом непосредственного воздействия на функционирование систем;

б) уровня радиоактивности в первом контуре термоэлектрических ядерных двигательных установок (ЭЯДУ) (сохранение продуктов деления в топливе, температурный режим и т.д.);

- c) приемлемых доз облучения для экипажей космических кораблей;
- d) прикладных планетарных исследований, для которых с точки зрения естественного фона должен определяться периметр (или пределы площадки), где вклад реактора становится несущественным.

7. Вместе с тем следует учитывать, что помимо ситуаций вдали от Земли другие важные вопросы, касающиеся безопасности, связаны с возвращением (штатным или аварийным) космических ядерных установок в атмосферу Земли. Все эти вопросы безопасности, с одной стороны, связаны с используемым типом ядерной установки, а с другой стороны являются общими для возможных конкретных ситуаций на каждом этапе программы полета, начиная от предпускового этапа и до окончательного увода ЯЭУ. Эти темы обсуждаются ниже.

III. Конкретные требования, касающиеся безопасности ядерных энергетических установок в нормальных условиях эксплуатации в космическом пространстве

8. Что касается нормальных условий эксплуатации космического реактора, то требования безопасности можно свести к следующему:

- a) до выведения на безопасную рабочую орбиту реактор должен оставаться свободным от радиоактивных продуктов;
- b) рабочие орбиты должны определяться таким образом, чтобы до возможного вхождения в атмосферу мог произойти распад радиоактивных продуктов до ничтожно низких уровней;
- c) после эксплуатации реактор должен оставаться в космосе.

A. Чистый реактор и орбита пуска реактора

9. Первое из вышеизложенных положений предусматривает, что, даже если строгая конструкция реактора не допускает несанкционированного пуска и эксплуатации, с одной стороны, космический аппарат должен выводиться на орбиту с чистым реактором, а с другой стороны, эксплуатация допускается только после успешного выведения на безопасную орбиту. Во-первых, безопасные орбиты для пуска реакторов еще предстоит определить, что станет одной из целей обеспечения безопасности. Во-вторых, с учетом прежней рекомендации Комитета по использованию космического пространства в мирных целях будут разрешены лишь реакторы на основе свежего уранового топлива. По этой причине топливом в большинстве ядерных реакторов, используемых в космонавтике, является обогащенный уран-235, особенно высокообогащенный уран (93 процента), из соображений компактности и требований к минимальной массе.

10. С другой стороны, поскольку топливом для космических реакторов служит довольно значительное количество высокообогащенного урана, требуется решить вопросы о гарантиях в отношении предназначенных для использования в космосе ядерных реакторов во время их наземной транспортировки, вывода и

после вывода на орбиту. Такие системы должны оставаться под контролем стабильных правительств, которые твердо придерживаются принципа нераспространения.

В. Рабочие орбиты

11. Кроме того, после того как "холодный" некритический ядерный реактор с урановым топливом выведен на орбиту, требуется принятие мер предосторожности в отношении рабочих орбит, если планируется возвращение на околоземную орбиту (полет с возвращением, ускорение с использованием гравитации Земли и т.д.) или если ЭЯДУ просто остаются долгое время на околоземной орбите на этапе их ускорения. Эти рабочие орбиты должны отличаться от орбиты пуска реактора, учитывая высокую радиоактивность реактора, и в рамках требований безопасности должны соответственно определяться с учетом срока пребывания на орбите и запасом радиоактивности реактора (времени распада).

С. Окончательный вывод

12. И наконец, требуется определить конкретные орбиты для окончательного вывода космических реакторов с учетом возрастания риска столкновения с метеоритами или космическим мусором вследствие более длительного времени пребывания. Будут изучаться альтернативные решения, например, выведение ЯЭУ на орбиты выхода из Солнечной системы или их направление к Солнцу, которые могут быть рекомендованы для обеспечения безопасности в качестве варианта, основанного на компромиссе между снижением риска и технической осуществимостью обеспечения необходимого дополнительного запаса энергии (для продления ресурса активной зоны реактора).

Д. Радиационное воздействие ядерных энергетических установок

13. Вместо биологической защиты (как в наземной ядерной энергетике) в конструкции ЯЭУ обычно используется тепловой защитный экран. Излучение, создаваемое реактором, можно таким образом уменьшить до ничтожно низкого уровня по отношению к естественной окружающей среде, но при этом важно отметить, что для пилотируемых полетов необходимо регламентировать предельно допустимые дозы. Установление таких предельных доз будет оказывать существенное влияние на эксплуатационные характеристики систем: удельную тягу ТЯДУ на единицу массы или удельную мощность ЭЯДУ на единицу массы.

IV. Особенности обеспечения безопасности ядерных энергетических установок в аварийных ситуациях в космическом пространстве

14. Как уже было указано, задачи обеспечения безопасности зависят от этапов программы полета и тесно связаны с типом используемой ядерной установки. За исключением этапа выведения на орбиту, который следует рассматривать отдельно, различные этапы космических миссий можно кратко охарактеризовать следующим образом:

а) околоземная орбита, на которую приходится либо этап физического пуска, либо эксплуатационный этап (при полетах с возвращением либо при простом пролете или многократных пролетах рядом с Землей). В отношении этапа физического пуска важно отметить, что короткое время подачи топлива в ТЯДУ (с большой силой тяги) позволит снизить риск аварий, связанных с активной зоной. И наоборот, для ЭЯДУ с малой силой тяги требуются более длительные периоды перехода в околоземном пространстве с действующим реактором;

б) межпланетные полеты, в которых, возможно, допустимы аварии, неприемлемые на околоземной орбите. Это означает, например, возможность рассмотрения снижения запаса прочности для дальних космических полетов применительно к различным критериям безопасности в отличие от требуемых на околоземной орбите. В этом случае в течение жизненного цикла реактора могут ставиться различные задачи по обеспечению безопасности, что полностью отличается от подхода к стандартной энергетической установке;

в) применение на других планетах, что вновь требует решения иных задач по обеспечению безопасности, чем применительно к наземным энергетическим установкам ввиду различия в количестве людей, которых это, возможно, будет касаться в аварийной ситуации, а также отсутствия биосферы. Вместе с тем в отношении энергетических установок следует учитывать стандартные меры в связи с такой распространенной аварией, как потеря теплоносителя, вопросы, связанные с удалением остатков топлива, и т.д. Кроме того, присутствие РТГ на Луне указывает на то, что в настоящее время нельзя исключать возможность рассмотрения планет в качестве конечных хранилищ наземных α -радиоактивных отходов, что потребует особого регулирования.

15. И наконец, требования в отношении надежности космической миссии в некоторых случаях могут превосходить цели и задачи по обеспечению безопасности. Несомненно, что резервирование определенных компонентов и необходимость содержания ЯЭУ в состоянии готовности для обеспечения успеха миссии будет также способствовать обеспечению безопасности.

A. Аварии на околоземной орбите

16. Защита от опасностей, связанных с аварийным возвращением на Землю, означает исключение сценариев возвращения радиоактивных объектов в плотные слои атмосферы после начального физического пуска. Снижению вероятности таких ситуаций может способствовать выбор адекватных

устойчивых орбит функционирования и траекторий полета. Кроме того, снижению рисков будет способствовать также сохранение маневренности системы даже в аварийных ситуациях. Следует вновь отметить, что поддержание такого ослабленного режима работы может быть одной из важных задач с точки зрения обеспечения надежности миссии. Сохранение маневроспособности ЭЯДУ или ТЯДУ означает обеспечение минимальной тяги в случае повреждения активной зоны (заглушенный тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ), вышедший из строя прибор управления реактивностью и т.д.). Это означает также обеспечение наличия некоторых резервных элементов (турбонасосной системы, разделенного радиатора и т.д.) на случай отказа системы преобразования.

17. В отличие от наземных энергетических установок в космическом реакторе невозможно использовать противоаварийную/защитную оболочку. Это означает, во-первых, что реактор должен, насколько это возможно, оставаться целым при аварии, и, во-вторых, что конструкция реактора должна обеспечивать сохранение его безопасности даже в случае аварии. Так, управление реактивностью должно сохраняться в любой ситуации, равно как и управление отводом остаточных тепловыделений активной зоны в случае потери теплоносителя. Управление реактивностью включает:

а) отрицательный пустотный коэффициент во избежание мгновенной критичности в случае потери теплоносителя;

б) отрицательный общий мощностной коэффициент для самоограничения реакции деления при всех обстоятельствах, связанных с изменением температурного режима (во избежание мгновенной критичности реактора);

в) достаточное доплеровское расширение, позволяющее ограничить повышение температуры топлива и избежать расплавления активной зоны в случае возможной аварии (авария вследствие внезапного увеличения реактивности). Следует отметить, что часть космических реакторов составляют небольшие реакторы на быстрых нейтронах и что спектр быстрых нейтронов часто ведет к очень низким доплеровским коэффициентам, но при этом использование урана в качестве топлива дает значительный запас устойчивости в том, что касается мгновенной критичности ($\beta \sim 650$ в сотнях к тысяче (pcm))^c;

г) оценку влияния естественного космического излучения (например, возмущения вследствие солнечного р-потока при всплеске солнечных космических лучей) на цепную реакцию деления.

18. Что касается решения проблем, связанных с потерей теплоносителя и отводом остаточных тепловыделений, то следует отметить различие между ТЯДУ и ЭЯДУ по плотности энерговыделения в активной зоне:

а) по сравнению с наземными энергетическими установками в ТЯДУ, которые характеризуются высокой плотностью выделения энергии, входит больше находящихся под давлением баков с теплоносителем и/или дополнительных активных систем безопасности. В отличие от ЭЯДУ отвод остаточных тепловыделений в ТЯДУ также требует принятия особых мер предосторожности в том, что касается получаемой остаточной тяги;

б) для ЭЯДУ, характеризующихся низкой плотностью выделения энергии, сохраняется возможность пассивного отвода остаточных тепловыделений, и в

этом случае могут ожидать лишь эффекты проводимости и радиационного теплообмена в соответствии с принципами проектирования высокотемпературных реакторов, которые уже эксплуатировались в прошлом.

В. Другие возможные сценарии аварийных ситуаций

19. Для обеспечения учета при проектировании и эксплуатации космических ЯЭУ риска столкновения с метеорными телами необходимо сформулировать соответствующие критерии и требования безопасности. Вследствие столкновения с метеоритами действительно возможны аварии с потерей теплоносителя или частичное нарушение цикла преобразования энергии (турбонасос или особенно радиатор ЭЯДУ и т.д.). Эти сценарии необходимо систематизировать по шкале явлений, в которой степень их последствий и вероятности связана с массой и размерами метеорита^d.

У. Основные вопросы обеспечения безопасности при выведении на орбиту ядерных энергетических установок

20. Во-первых, важно учитывать, что у радиоизотопных систем (РТГ) и реакторных систем (ТЯДУ и ЭЯДУ) будут разные начальные запасы радиоактивности. В урановом ядерном реакторе радиоактивность обычно составляет несколько кюри, а в проектах на основе РТГ с использованием в качестве топлива чистого диоксида плутония ($^{238}\text{PuO}_2$) – несколько сотен килокюри. В таблице ниже приведены несколько примеров стандартных запасов типичных космических кораблей с РТГ или реактором на борту и несколько примеров аварий с обоими типами ЯЭУ (в кюри):

<i>Космический аппарат с РТГ (Cassini)</i>	<i>Космический аппарат с ядерным реактором</i>	<i>Авария с РТГ SNAP-9</i>	<i>Авария со спутником "Космос-954"</i>	<i>Авария на Чернобыльской АЭС</i>
~500 кКи	несколько Ки	17 кКи	85 кКи (потенциальный запас) 50 Ки (собрано)	>МКи

21. Вместе с тем отсутствие начальной радиоактивности в ЯЭУ реакторного типа компенсируется опасностью критичности. Действительно, если можно предусмотреть целостность РТГ в случае вхождения в плотные слои атмосферы Земли, то должны быть сформулированы конкретные критерии и требования безопасности для обеспечения того, чтобы реактор оставался заглушенным в случае аварий при выведении на орбиту (во избежание возникновения критичности). Можно упомянуть два подхода:

а) во избежание сбоев в траектории полета и для предупреждения опасности возникновения критичности активной зоны в отношении ЯЭУ может применяться система подрыва по команде, как это практикуется в отношении ракет-носителей. Такой вариант разрушения/рассеивания может быть применим к урановым ядерным реакторам, которые, с одной стороны, характеризуются очень низким уровнем радиоактивности, а, с другой стороны, не могут прийти в критичное состояние, если системы разрушения способны обеспечить

диспергирование твэлов. С помощью резервных и пассивных устройств можно обеспечить разлет топливных элементов и избежать критических конфигураций. Однако учитывая, что в космических ядерных реакторах в основном содержится высокообогащенный уран, этот вариант может оказаться неприемлемым в плане распространения^e;

b) контроль уровня реактивности активной зоны должен обеспечиваться в любых ситуациях, связанных с "захлебыванием" или уплотнением в активной зоне. Существует множество возможных решений, например использование специальных поглощающих систем безопасности, загрузка топлива на орбите и отравление активной зоны реактора, однако эти решения существенно влияют на эксплуатационные характеристики глобальных систем.

VI. Другие особенности обеспечения безопасности ядерных энергетических установок в космическом пространстве

22. Необходимо отметить также некоторые особенности обеспечения безопасности, связанные с использованием ядерных установок в космическом пространстве:

a) некоторые транспортные и технологические операции могут осуществляться при уже загруженном ядерном реакторе;

b) реактор должен будет функционировать в двух средах (земной и космической) без каких-либо границ нахождения. Это еще более затрудняет определение критериев безопасности. В частности, ограничение выброса радиоактивных продуктов деления в ходе наземных испытаний прототипных ЯЭУ является фактором, лимитирующим силу тяги двигательной установки;

c) фактор невесомости в межпланетных полетах затрудняет использование естественной конвекции для отвода остаточных тепловыделений (пассивная система безопасности) и следовательно может лимитировать плотность энерговыделения в активной зоне ЭЯДУ;

d) задержка прохождения сигналов управления в случае значительной удаленности объекта от Земли может быть фактором, затрудняющим управление реактивностью в аварийных ситуациях. Если этот вопрос будет отнесен к вопросам обеспечения безопасности, то для телеметрического контроля системы следует установить некоторые критерии эффективности функционирования, касающиеся управления реактором.

VII. Правовая основа для определения целей обеспечения безопасности

23. Цели обеспечения безопасности могут содействовать определению того, является ли космическая ЯЭУ достаточно безопасной. Таким образом, выработка рекомендаций и руководящих принципов обеспечения безопасности может содействовать принятию решений органами надзора за обеспечением безопасности; поэтому применительно к использованию ЯЭУ в космическом пространстве важно определить, кто принимает решения (оператор,

регулятивный орган, проектировщик, общественность или министр) и кто несет юридическую ответственность (например, при участии нанимающего органа).

24. Большинство решений в отношении наземной ядерной энергетики принимаются на национальном уровне, однако применительно к использованию ядерной энергии в космическом пространстве явным образом должны быть представлены международные интересы, поскольку вовлеченные страны должны в большей степени учитывать трансграничные последствия возможных аварий с космическими ЯЭУ. На диаграмме ниже на основе наземной ядерной энергетики представлен пример того, кто мог бы участвовать в процессе рассмотрения и утверждения требований безопасности для космической ядерной энергетики:



Примечания

- ^a *Практика регулирования и нормы безопасности для атомных электростанций: труды Международного симпозиума по практике регулирования и нормам безопасности для атомных электростанций*, Международное агентство по атомной энергии, Серии трудов совещаний (Вена, МАГАТЭ, 1989 год).
- ^b M. S. El-Genk, ed., *A Critical Review of Space Nuclear Power and Propulsion: 1984-1993* (New York, American Institute of Physics Press, 1994).
- ^c S. Bernard and others, “Conceptual design of the MAPS NTP cargo shuttle based on a PBR”, paper prepared for the 13th Symposium on Space Nuclear Power and Propulsion, Albuquerque, New Mexico, 1996.
- ^d European Space Agency, *Lunar Nuclear Power System (LunPS) Studies* (1998).
- ^e E. Rigaut and X. Raepsaet, “First studies on the Optimized Propulsion Unit System OPUS within the current Nuclear Space Program in CEA” – документ, представленный на Конференции по космической ядерной энергетике, проходившей в Сан-Диего, Калифорния, 5–9 июня 2005 года.
-