

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГИЯ В КОСМОСЕ: ВОЕННЫЕ АСПЕКТЫ И ОПАСНОСТЬ ДЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

О.Ф. Прилуцкий и С.Н. Родионов

Потенциальная опасность размещения источников ядерной энергии в космосе вызывает в последнее время беспокойство со стороны многих представителей мировой научной общественности. Упомянутся, по крайней мере, два важнейших аргумента в защиту подобной отрицательной позиции:

- Космические источники ядерной энергии объявлены важной частью военной программы стратегической оборонной инициативы (СОИ). Даже если бы интерес к военному использованию космической ядерной энергии удался нейтрализовать, наличие в космосе значительного количества невоенных источников ядерной энергии всегда служило бы соблазном для возрождения идей милитаризации космического пространства.

- Расположенные на околоземных орбитах ядерные реакторы всегда будут оставаться потенциальным источником выпадения радиоактивных веществ на Землю. Радиоизотопные источники энергии со многими килограммами плутония-238 также являются опасным источником глобального радиоактивного заражения.

Авторы являются членами Комитета советских ученых в защиту мира, против ядерной угрозы, и работают в Институте космических исследований Академии Наук СССР.

Статья подготовлена в рамках совместного исследовательского проекта по сокращению вооружений, организованного Комитетом советских ученых в защиту мира, против ядерной угрозы и Федерацией американских ученых.

РЕАКТОРЫ И ПОТРЕБНОСТИ СОИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Противоракетная оборонительная система космического базирования с использованием новых, так называемых "экзотических" средств поражения (например, лазерных пучков, пучкового оружия, электромагнитных пушек и т.д.) будут нуждаться в очень высоком энергопотреблении.

Рассмотрим три режима работы гипотетической космической боевой станции:

- режим ожидания, когда станция выполняет весьма ограниченный набор операций, а энергия требуется только для крио-генного охлаждения датчиков, операций бортовых ЭВМ и т.д.

- режим тревоги, когда все элементы станции активируются и приводятся в состояние боевой готовности;

- боевой режим, когда вся накопленная энергия направляется на сотни или тысячи целей за относительно короткое время (исчисляемое сотнями секунд).

С точки зрения энергопотребления существенны операции ориентации и маневрирования, особенно в режиме тревоги, где они могут продолжаться длительное время.

Они связаны, например, с той ситуацией, когда станция должна зафиксировать в реальном времени все запуски ракет сопер-

ника. Примем для определенности, что стартовые шахты разделены расстоянием порядка 50 км. Это означает, что угол перевода ориентации составит около 0,1 радиана, если станции развернуты на высоте порядка 500 км. Время перенацеливания должно быть достаточно малым - оно оценивается величиной 0,1 с. Темп энергозатрат P можно определять по простой формуле

$$P = I\omega(d\omega/dt)$$

где I - момент инерции, ω - угловая скорость, а $d\omega/dt$ - угловое ускорение. Для приведенного выше примера угловая скорость равна примерно 1 радиан/сек, а угловое ускорение - 10 радиан/сек².

Естественно, что нет необходимости для перенацеливания поворачивать всю станцию целиком. Достаточно поворачивать лишь одно боевое зеркало. Предположим, что диаметр зеркала R равен 6 м, а полная масса его подвижной части m_m - 10 тоннам. Момент инерции такой системы равен

$$I = m_m R^2/4,$$

то есть $2 \cdot 10^2$ кг м², а требуемая мощность составит $2 \cdot 10^4 \times 1 \times 10 = 0,2$ МВт. Такой объем энергопотребления характерен как для боевого режима, так и для режима тре-

воги, когда требуется проверить быстродействие всех систем.

Относительно просто оценить энергозатраты на маневрирование станции массы m_s , в частности, на изменение высоты орбиты или ее наклона.

Из очень простой формулы

$$\Delta E = m_s g \Delta h / 2$$

следует, что при изменении высоты орбиты Δh энергозатраты составят 5 мегаджоулей на тонну на километр изменения высоты орбиты (принимается, что $g = 10 \text{ м/с}^2$, то есть орбита достаточно низкая; множитель $1/2$ связан с тем, что полная энергия в кулоновском поле составляет половину потенциальной энергии).

При изменении наклона орбиты необходимые энергозатраты определяются из выражения

$$\Delta E = m_s v^2 \alpha,$$

где α - угол поворота плоскости орбиты и v - орбитальная скорость. Подстановка численных данных ($v = 7,6 \text{ км/сек}$) для орбиты с высотой 500 км приводит к более заметным энергозатратам, составляющим примерно один гигаджоуль на тонну на градус изменения наклона.

Характеристические времена для таких маневров не должны быть слишком малыми, чтобы не вызвать перегрузки систем питания - речь может идти о десятках секунд, так что соответствующие мощности лежат в интервалах 10 - 100 МВт (с учетом 10%-ной эффективности преобразования тепловой энергии в электроэнергию).

Режим тревоги характеризуется уровнем потребной электрической мощности порядка 1 - 10 МВт. Но наиболее важная особенность этого режима заключается в абсолютной непредсказуемости момента выхода на режим длительности каждого операционного периода и полного числа включений. Согласно ряду подсчетов полный временной интеграл по этому режиму мог бы достигнуть нескольких лет. Столь специфические условия подразумевают, что обычные расходомерные материалы не подходят для режима тревоги, который остро нуждается в ядерных реакторах космического базирования как в единственно возможном источнике энергии. Кстати, такие реакторы, работающие на более низком уровне мощности, могли бы использоваться и как источники энергии для режима ожидания. Но если обороняющаяся сторона не хочет, чтобы соперник знал о размещении реакторов в космосе до определенного вре-

мени, она может не использовать реакторы в режиме ожидания и держать их "невидимыми" до первого включения в режиме тревоги.

Боевой режим, несмотря на энергетические требования, не должен, как мы полагаем, обязательно опираться на ядерную энергию.

Гипотетический ядерный реактор для боевого режима должен обладать уровнем мощности в несколько ГВт (речь идет об электрической мощности, а тепловая должна быть на порядок величины выше). Конструирование и сооружение столь мощных реакторов космического базирования представляет собой исключительно серьезную проблему, многие аспекты которой просто еще не осознаны в настоящее время.

Можно попытаться сделать приблизительную оценку массы столь мощного реактора. Если уровень мощности достаточно высок, то масса и размеры реактора начинают определяться максимально допустимыми тепловыми потоками внутри его элементов. В этом параллельном случае отношение масса/мощность от мощности уже не будет зависеть. Соответствующие расчеты¹ дают для этого отношения предельное значение 0,2-0,3 кг/кВт. Аппроксимация этих данных на большие мощности неправомерна - формально полученный вес 10000 тонн для реактора мощностью 50 ГВт выглядит явно нелепо. При столь высоких мощностях необходим иной конструктивный подход к решению проблемы. Например, в докладе группы экспертов Американского физического общества по оружию с направленной передачей энергии упоминаются в качестве перспективных импульсные реакторы с удельным энерговыделением порядка 10-100 кВт/кг.²

Практически, как нам кажется, наиболее вероятно, что энергия для использования в боевом режиме должна быть предварительно накоплена.

Попробуем оценить этот необходимый энергозапас. Было подсчитано, что при каждом выстреле "экзотического" оружия выделяется около 100 МДж энергии³. Предполагается, что боевая космическая станция нацелена на уничтожение, скажем, тысячи целей за сто секунд. С учетом возможных промахов и дополнительного расхода энергии на систему САТКА (обзор, обнаружение цели и оценка поражения) можно прийти к заключению, что необходимо запастись около 300-500 ГДж энергии на космической станции для обеспечения боевого режима.

Одним из альтернативных источников энергии могли бы стать химические ре-

акции. Например, сгорание бериллия в атмосфере фтора приводит к выделению около 30 МДж на каждый кг реагирующей смеси.⁴ Если положить эффективность преобразования в электроэнергию химической энергии равной 10%, то полная масса химического топлива для обеспечения боевого режима будет составлять порядка 100 тонн.

Итак, реализация программы СОИ зависит от разработки и сооружения ядерных реакторов космического базирования с тепловой мощностью до 100 МВт. Такие реакторы должны использоваться лишь в режиме тревоги (а при более низкой мощности будут работать и в режиме ожидания). Требуемый уровень мощности далеко превосходит современный уровень технологии космической ядерной энергетики. Если в этой сфере деятельности будут одобрены соответствующие НИОКРы, то кажется неизбежной программа испытаний реакторов в космосе, включая и полномасштабные испытания.

ОПАСНОСТЬ ДЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Космические реакторы. Испытания и развешивание мощных реакторов на низких околоземных орбитах могут оказаться источниками случайных атмосферных загрязнений как самим ядерным горючим (например, в результате аварии на старте), так и продуктами распада.

Для оценок последствий инцидентов при запуске следует помнить, что ядерным топливом служит высокообогащенный уран: 95-97% урана-235 и 3-5% урана-238. Радиоактивность этих изотопов урана сравнительно низка, для урана-235 она составляет около $2 \cdot 10^{-6}$ кюри/г, для урана-238 еще в семь раз ниже.

Во многих справочниках по ядерной дозиметрии (см., например⁵) приведены предельно допустимые для населения концентрации урана в воздухе. Для урана-235 эта величина составляет $4 \cdot 10^{-15}$ кюри/л, а для урана-238 она равна $2,5 \cdot 10^{-15}$ кюри/л. Можно сразу же сделать пересчет к другим переменным (грамм/л): $2 \cdot 10^{-9}$ г/л для урана-235 и 10^{-8} г/л для урана-238.

Нам нехватает еще информации о полной массе уранового горючего в самом космическом реакторе. Как правило, подобная информация не отличается высокой точностью, поскольку не всегда известна в деталях конструкция реактора. Например, в реакторах на быстрых нейтронах масса горючего максимальна, а рабочий объем минимален, в реакторах на медленных нейтронах наблюдается противоположная картина.⁶

Ознакомление с имеющейся информацией по конструкции работающих и проектируемых реакторов космического базирования показывает, что масса ядерного горючего лежит в интервале 30-170 кг. Для дальнейших оценок примем для этого параметра определенное значение 100 кг.

Используя приведенные ранее данные по допустимым концентрациям урана-235 (относительное содержание урана-238 слишком мало, чтобы привести к заметным поправкам), можно получить представление о размерах зараженного объема атмосферы в том случае, если в результате какой-то аварии на старте весь уран превратится в мелкую пыль (наихудший сценарий!). В ответе окажется величина $5 \cdot 10^{13}$ л или 50 км³. Конечно, это чересчур завышенная оценка, но она показывает, что подобный радиоактивный выброс гипотетического характера может привести лишь к достаточно локальным последствиям.

Оценим потенциальную опасность от входа в атмосферу ядерных реакторов, проработавших какое-то время в космосе.

Хорошо известно, что при делении одного ядра урана-235 полный энергетический вывод составляет 203,9 МэВ. Таким образом, один миллион ватт тепловой энергии соответствует $3 \cdot 10^{16}$ делений в секунду.⁷ Уровень производительности реактора можно выразить в единицах МВт год, что соответствует 10^{24} делениям (400 г урана-235), или образованию 9 г стронция-90 (около 2000 кюри) и 14 г цезия-137 (также около 2000 кюри). Накопление в работающем реакторе биологически опасных изотопов увеличивает риск длительного нахождения мощных реакторов на околоземной орбите. Например, реактор SP-100, разрабатываемый НАСА, должен обладать тепловой мощностью до 2 МВт и рассчитан на срок службы порядка 10 лет, после чего в нем накопится около 10^5 кюри стронция и цезия. Любое происшествие с таким реактором может привести к выпадению заметной части этих продуктов на Землю, что по своим долгосрочным последствиям может оказаться сравнимым с эффектом от чернобыльской аварии.⁸

Радиоизотопные тепловые генераторы. Напомним список радиоактивных изотопов, которые могут быть использованы в качестве источника тепловой энергии для таких генераторов (см. табл. 1)

Без сомнения, по компактности энерговыделения предпочтительно иметь дело с альфа-источниками. Важной характеристикой служит также время жизни (особенно для использования в космосе на длительное время). Наконец, следует учитывать досту-

Таблица 1

Источники энергии для радиоизотопных генераторов

Изотоп и характер распада	Время полураспада (годы)	Отношение мощности к массе (Вт/г)
Полоний-210	0,38	141
Кюрий-244	0,45	120
Церий-144	0,78	26
Торий-228	1,9	170
Кобальт-60	5,25	17,4
Кюрий-242	18	2,8
Стронций-90	28	0,9
Сезий-137	30	0,4
Плутоний-238	89	0,55

пность того или иного изотопа, то есть возможность получать его в заметных количествах. По совокупности этих требований плутоний-238 стоит вне конкуренции на роль источника энергии для космических энергосистем с преобразованием тепловой энергии в электрическую.

Как известно, этот изотоп используется в программах "Галилей" и "Улисс", где его масса составляет по 10 кг, что обеспечивает около 5 кВт тепловой мощности и, примерно, 1 кВт - электрической.

Попробуем проанализировать наихудший сценарий - последствия аварии на старте, результатом которой стало бы превращение всего плутония в мелкую пыль и рассеяние этой пыли в атмосфере на значительные расстояния. Предельно допустимая для населения концентрация плутония-238 в воздухе составляет $7 \cdot 10^{-17}$ кюри/л. Принимая во внимание относительно высокую удельную активность этого изотопа (около 18 кюри/г), можно показать, что минимальный зараженный объем может оказаться весьма значительным - около $2,6 \cdot 10^{17}$ литров на грамм.

Поэтому 10 кг плутония-238 теоретически могли бы заразить объем в $3 \cdot 10^{21}$ литров, или $3 \cdot 10^9$ кубических километров.

Для сравнения отметим, что весь объем земной атмосферы (до высоты 10 км) составляет $5 \cdot 10^9$ км³. Конечно, приведенные расчеты не могут иметь количественного смысла, но качественный вывод очевиден - подобное происшествие может оказаться глобальным по своим последствиям.

Аналогичные расчеты, выполненные для других долгоживущих изотопов, дают следующие результаты (при условии, что

тепловая мощность равна 5 кВт):

- зараженный объем для кобальта-60 составляет 10^6 км³;
- зараженный объем для стронция-90 составляет $2 \cdot 10^7$ км³.

Сами по себе эти результаты не столь велики, как для случая с плутонием-238, но и они не исключают заражения достаточно большого объема атмосферы.

Для стронция гораздо большую опасность представляют долговременные последствия, связанные с вовлечением этих изотопов в биологическую цепочку и попаданием в человеческий организм через продукты питания.

Вообще говоря, определение порога относительной безопасности для массы радиоактивного изотопа в термоэлектрогенераторе (если таковой существует) требует дальнейшего более детального исследования. Ясно только, что длительное нахождение таких радиоактивных источников на околоземной орбите представляется нежелательным в связи с конечной вероятностью входа в атмосферу.

ВЕРИФИКАЦИЯ

Перейдем теперь к рассмотрению другого аспекта проблемы - насколько надежно можно обнаружить работающий реактор космического базирования при помощи дистанционных методов.

В принципе, ядерные реакторы космического базирования могут быть обнаружены по собственному нейтронному и гамма-излучению, а также по инфракрасному (тепловому) свечению теплообменных радиаторов.

Напомним, что один киловатт тепловой мощности соответствует $3 \cdot 10^{13}$ делений в секунду, или испусканию $7 \cdot 10^{13}$ быстрых нейтронов в секунду и $2,5 \cdot 10^{14}$ мгновенных гамма квантов в секунду (со средней энергией около 1 МэВ), далее за счет накопления продуктов деления интенсивность излучения гамма-квантов возрастает почти вдвое.

Изотопный термоэлектрогенератор на основе плутония-238, работающий на уровне 1 кВт (т.е. содержащий 1,8 кг плутония) будет обладать следующими эмиссионными способностями (в секунду):

$5 \cdot 10^6$ быстрых нейтронов,
 $1,5 \cdot 10^7$ фотонов с энергией 1 МэВ,
 $2,7 \cdot 10^8$ фотонов с энергией 0,766 МэВ,
 $1,2 \cdot 10^{10}$ фотонов с энергией 0,153 МэВ.

Отсюда можно сделать вывод, что изотопные термоэлектрогенераторы по сравнению с реакторами сопоставимой мощности представляют из себя гораздо более слабые источники излучения, что ограничивает возможности их обнаружения методами ядерной физики.

Однако, это не перечеркивает все возможности обнаружения в космосе и таких источников энергии, поскольку от них можно детектировать избытки теплового излучения, как и от ядерных реакторов той же мощности.

Факторы, влияющие на возможность обнаружения, обсуждаются более детально в других статьях данного раздела. Общий вывод этих статей заключается в том, что действующие (или недавно отключенные) ядерные реакторы космического базирования могут быть обнаружены с высокой степенью достоверности. Однако неработавшие

реакторы останутся невидимыми для пассивных методов обнаружения. Только контроль перед стартом сможет определить наличие в составе полезной нагрузки конструкций, напоминающих ядерный реактор.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ.

1. Теория и расчет энергосиловых установок космических летательных аппаратов. М., Машиностроение, 1984.
2. Reviews of Modern Physics, 59, No.3, part 2, 1987.
3. Космическое оружие: дилемма безопасности, под ред. Е.П. Велихова, А.А. Кокошина, Р.З. Сагдеева, М., Мир, 1986.
4. См. ссылку 1.
5. А.Моисеев, В.Иванов, Справочник по дозиметрии и радиационной безопасности, М., Атомиздат, 1974.
6. В.А. Кузнецов, Ядерные реакторы космических энергетических установок, М., Атомиздат, 1977.
7. Поскольку на одно деление выделяется 200 МэВ энергии, 1 МэВ равен $1,6 \cdot 10^{-13}$ Дж, а 1 кВт = 1000 Дж/с.
8. Примечание редактора: по оценкам в чернобыльской аварии из реактора выделилось 1-5 мегакюри цезия-137 и около 0,2 мегакюри стронция-90. Ожидаются десятки тысяч заболеваний раком от соответствующих радиоактивных осадков. См. статью C.Noehnasmer, "The Accident of Chernobyl: Health and Environmental Consequences and the Implications for Risk Management," Annual Review of Energy, 13, (1988), p.383.