

## БЕЗОПАСНОСТЬ АТОМНЫХ РЕАКТОРОВ

Обычный подход в оценке безопасности реакторов ограничивается определением степени его радиационного воздействия на персонал, окружающую среду, и население в различных условиях – нормальных и аварийных. При этом любой реактор считается безопасным, если радиационное воздействие от него не превышает директивно принятых значений небольшого числа параметров (допустимые выбросы радионуклидов через вентиляционную трубу, годовая доза облучения персонала и т.д.). Безусловно, принимается во внимание и количество отказов оборудования, уровень подготовки персонала и качество технической и эксплуатационной документации, но все это считается вторичным, а первичными являются физические параметры получения энергии в реакторе. Но почему-то они, как раз, и не рассматриваются. Хотя каждому понятно, что чем выше рабочее давление в реакторе, чем выше температура теплоносителя, чем агрессивнее теплоноситель по химическому составу – тем труднее удержать эти параметры в безопасных пределах, а значит и потенциальная опасность такого реактора выше.

Идем дальше, к делению атомного ядра, которое добавляет к теплотехническим параметрам еще два чрезвычайно опасных момента.

Первый из них принципиально определяет уровень ядерной безопасности, и состоит в том, что для работы любого реактора нужно загрузить в его активную зону несколько критических масс делящегося вещества. Иначе реактор не сможет проработать и часа, а энерговыделением в его объеме нельзя будет управлять с помощью стержней – поглотителей нейтронов, они его сразу «заглушат». Налицо дилемма – загружая в реактор несколько критмасс – мы делаем из него бомбу, а если ограничимся загрузкой только одной критмассы – он вообще не будет работать. Отсюда вывод, если для получения энергии мы выбираем реакцию деления ядер (урана-235, или урана-238, или плутония-239) – то неизбежно переходим границу безопасности, поскольку грузим в реактор несколько критмасс (на практике – до сотни критмасс). Недаром И.В. Курчатов называл атомный реактор «тлеющей бомбой», а П.Л. Капица определил АЭС как «бомбы, вырабатывающие электричество».

В 1999 году к этому определению добавил свой штрих участник советского бомбового проекта физик Л.П. Феоктистов, написавший книгу «Оружие, которое себя исчерпало». В этой книге он отметил еще одну важную «ахиллесову» пятую реакторов. Речь идет о системе управления и защиты, основанной на введении в реактор стержней – поглотителей нейтронов. Сегодня все действующие корпусные атомные реакторы имеют внутреннее давление от 157 до 200 атмосфер. И стоит только эти системы управления (стержни), которые выходят за крышку реактора через специальные уплотнения, повредить (любым вариантом – диверсией, гранатой, самолетом) – стержни мгновенно вылетят из активной зоны. На этом основании все существующие реакторы академик Феоктистов назвал опасными, потому что «при извлечении регулирующих стержней из активной зоны в ней возникает значительная надкритичность. Цепная реакция в таких условиях будет развиваться настолько быстро, что никакая аварийная защита не поможет и реактор взорвется как бомба».

Все представляют, что будет, если бутылку шампанского нагреть и резко снять крепеж пробки. Пробка вылетит как пуля. Корпусные атомные реакторы уязвимы как раз по такому сценарию.

Напомню, что в атомной бомбе примитивного образца количество ядерной взрывчатки не превышает 15 килограммов. А в ядерном реакторе, например в ВВЭР – 1000 или в любом его зарубежном аналоге, загруженная масса делящегося изотопа (урана-235) равна тонне и больше.

Итак, все современные реакторы ядерноопасны. Но «тайна сия не нова есть», и попытки решить эту проблему были. Трудности здесь чисто технические, а значит решаемые. Например, для компенсации числа избыточных критмасс предлагалось вводить в реактор выгорающие поглотители нейтронов (гадолиний) и т.п. Были и другие предложения, но выбрали самую простую и опасную схему «тлеющей бомбы».

Второй нюанс принципиально определяет уровень радиационной безопасности всей атомной энергетики и состоит в выборе исходного делящегося вещества, от которого зависит спектр получаемых в реакторе трансурановых элементов. Выбрав для загрузки реактора уран-238, мы неизбежно придем к накоплению опаснейшего плутония-239. Именно этот – второй нюанс – в самой большой степени определяет радиационную безопасность атомной энергетики.

Но если мы выберем для загрузки реактора торий-232, то получим из него хорошо делящийся уран-233, который потом будет выгорать без остатка и на том процесс получения опасных изотопов практически прервется. Но самым чистым представляется процесс получения энергии на термоядерном реакторе, в котором идет реакция синтеза легких ядер, а не реакция деления тяжелых ядер.

Однако мы не будем здесь рассматривать физические тонкости всех вариантов выбора делящегося вещества для загрузки реакторов, констатируем только, что они есть и достаточно хорошо проработаны. Сейчас главное – выяснить, почему с самого начала, на заре атомной энергетики, ученые сделали выбор в

пользу создания безусловно радиационно- и ядерноопасного реактора, в процессе работы которого накапливаются смертельно опасные трансураниевые элементы (плутоний и т.д.) и образуется огромное количество опасных радиоактивных отходов.

Я не имею ни малейшего сомнения в том, что принятые в то время решения были осознанными и выстраданными. Поэтому дальше будет идти не поиск правых и виноватых, а только выяснение причин, по которым сегодня мы имеем опасную ядерную энергетику.

### **Важность правильного выбора цели**

Выше мы убедились, что в безопасном реакторе мощность энерговыделения не должна самопроизвольно «разгоняться» даже при запроектном, т.е. совершенно невероятном аварийном событии. Но можно ли вообще создать такой реактор?

При выборе способа достижения цели люди всегда исходят из нескольких соображений. Если целью является создание оружия, то в его производстве допускают значительный риск, если он неизбежен. Так было всегда и есть даже сейчас, например, при производстве взрывчатых веществ на основе нитроглицерина. На риск идут и тогда, когда давит дефицит времени и недостает средств на разработку более безопасных технологий.

Разработка и создание оружия нового поколения всегда требовали очень больших денег, эти работы всегда проводились в чрезвычайной спешке и всегда допускали значительный риск (иногда неосознанный, ввиду новизны) в процессе изготовления этих опасных изделий.

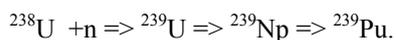
Совсем иначе обстоит дело при реализации мирной цели. Здесь риск уже неуместен - кому из производителей электроэнергии захочется приобретать «бомбу вырабатывающую электричество», если есть безопасные и менее дорогие альтернативные источники энергии! Время тоже не является предельно критическим параметром, даже при наличии конкуренции. Эти соображения дают основания признать, что ради мирной цели ни отдельные люди, ни государства не идут на заведомый риск.

*Примечание: в рамках американской программы создания безопасных «атомных котлов» ученые провели небольшую серию экспериментов с реакторами на полигоне, включая "раскачивание" реактора и даже его взрыв. Но это были эксперименты с существующими реакторами, а не поиск конструкции истинно ядернобезопасного аппарата [63].*

Для иллюстрации сравним работу по созданию ядерного оружия и разработку АЭС, использующую термоядерную реакцию. И США и СССР не пожалели денег на создание дорогущих и бесполезных термоядерных бомб, причем в кратчайшие сроки, а установку для мирного использования термоядерной реакции до сих пор не сделали, по недостатку средств. При этом все ждут, что это будет очень перспективный источник энергии, однако подтвердить это смогут только первые практические результаты, которые появятся не ранее чем лет через двадцать. Поэтому я предполагаю, что создание реакторов не обладающих ядерной безопасностью стало возможным лишь потому, что некоторыми учеными и политиками (нашими, и в США) был сделан неправильный выбор цели для приложения результатов, достигнутых атомной наукой в двадцатом веке. Я уверен, что если бы освоение атомной энергии начиналось с задачи создания конкурентоспособной электростанции с ядерным котлом, а не бомбы, то ядернобезопасный реактор давно был бы создан. И в основе такой атомной энергетики лежал бы не уран-плутониевый, а торий-урановый цикл, дающий меньше опасных отходов.

### **Торий, или уран? Вот в чем вопрос...**

Науке известны три делящихся изотопа – уран-235, плутоний-239 и уран-233. Уран-235 получают из природной смеси урана-235 и урана-238 методом разделения изотопов. Плутоний-239 нарабатывают в реакторах, где уран-238 превращается в плутоний по цепочке реакций



Уран-233 накапливают в реакторах, где торий-232 перерабатывается в уран-233, поэтому начальной загрузкой в реакторе может быть торий.

Сама идея использования тория для получения ядерной энергии не нова. Запасы этого элемента только в редкоземельных рудах втрое превышают все мировые запасы урана.

Ториевые энергетические ядерные реакторы были уже построены в нескольких странах:  
- В 60-мегаваттном реакторе Lingen типа BWR в Германии использовались твэлы из Th/Pu.  
- На базе реактора AVR в Германии был разработан 300 МВт-реактор THTR, проработавший с 1983 по 1989 годы; реактор работал на насыпном бланкете из 674000 элементов, из которых больше половины представляло собой уран-ториевое топливо, а остальные - графитовый замедлитель и нейтронные поглотители. Твэлы непрерывно обновлялись при загрузке, и в среднем прошли через реактор шесть раз. Производство топлива было поставлено на промышленную основу.

- Реактор Fort St Vrain был единственным в США коммерческим реактором, работавшем на ториевом топливе; этот реактор также был сконструирован на базе немецкого AVR и проработал с 1976 по 1989 годы. Это был высокотемпературный реактор (1300°C) с графитовым замедлителем и гелиевым охлаждением с проектной мощностью 842 МВт (330 МВт электрических). Топливные элементы были изготовлены из карбида тория и карбида Th/U-235 в виде микросфер, для удержания продуктов деления, покрытых диоксидом кремния и пироуглеродом. Твэлы имели форму шестигранных колонн ("призм"). В реакторе использовалось почти 25 тонн тория; глубина выгорания составила 170000 МВт·сутки/т.
- Исследования ториевого топлива для реакторов типа PWR проводились на американском реакторе Shippingport; в качестве исходного делящегося материала топлива использовались U-235 и плутоний. Здесь же с 1977 по 1982 годы успешно прошли испытания легководного бридерного реактора затравочно-бланкетного типа на ториево-урановом топливе, покрытым сплавом циркония.
- В Индии с целью повышения эффективности после запуска в блоки 1 и 2 АЭС в Какрапаре было загружено 500 кг ториевого топлива. Первый блок АЭС был первым в мире реактором, в котором для выравнивания мощности в активной зоне использовался не обедненный уран, а торий. Работая на ториевом топливе, 1-й блок вышел на полную мощность за 300 суток, а 2-й блок - за 100 суток. Ториевое топливо планируется использовать в блоках 1 и 2 АЭС в Кайга и в блоках 3 и 4 АЭС в Раджастане, которые находятся в стадии строительства.

*Примечание для подготовленных читателей: В приводимой ниже таблице представлены основные параметры делящихся изотопов.*

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕЛЯЩИХСЯ ИЗОТОПОВ						
Изотоп	Уран-235		Уран-233		Плутоний-239	
Энергия нейтрона	1 МэВ	0,025 эВ	1 МэВ	0,025 эВ	1 МэВ	0,025 эВ
Полное сечение	6,6 ± 0,1	695 ± 10	6,2 ± 0,3	600 ± 10	7,3 ± 0,2	1005 ± 5
Сечение деления	1,25 ± 0,05	581 ± 6	1,85 ± 0,10	526 ± 4	1,8 ± 0,1	751 ± 10
Доля ядер, не участвующих в делении	0,077 ± 0,002	0,174 ± 0,01	0,057 ± 0,003	0,098 ± 0,004	0,08 ± 0,1	0,37 ± 0,03
Число нейтронов, испускаемых в одном акте деления	2,6 ± 0,1	2,43 ± 0,03	2,65 ± 0,1	2,50 ± 0,03	3,03 ± 0,1	2,84 ± 0,06
Число нейтронов на один поглощенный	2,41 ± 0,1	2,07 ± 0,02	2,51 ± 0,1	2,28 ± 0,02	2,8 ± 0,1	2,07 ± 0,04
Доля запаздывающих нейтронов, %	0,64 ± 0,03	0,65 ± 0,02	0,26 ± 0,02	0,26 ± 0,01	0,21 ± 0,01	0,22 ± 0,01
Энергия деления	200 МэВ		197 МэВ		207 МэВ	
Все сечения ядерных реакций приведены в барнах ( $10^{-28} \text{ м}^2$ ).						

*Полное сечение характеризует вероятность взаимодействия любого типа между нейтроном и данным ядром. Сечение деления характеризует вероятность деления ядра нейтроном. От того, какая доля ядер участвует в процессе деления, зависит выход энергии на один поглощенный нейтрон. Число нейтронов, испускаемых в одном акте деления, важно с точки зрения поддержания цепной реакции.*

*Число новых нейтронов, приходящихся на один поглощенный нейтрон, характеризует интенсивность деления. Доля запаздывающих нейтронов связана с энергией, запасенной в данном материале. Запаздывающие нейтроны испускаются осколками деления после того, как деление исходного ядра уже произошло (с выходом, в момент деления, двух-трех так называемых мгновенных нейтронов деления).*

*Из таблицы видно, что каждый делящийся изотоп имеет свои преимущества. Например, в случае выбора изотопа с наибольшим сечением для тепловых нейтронов (с энергией 0,025 эВ), при использовании замедлителя нейтронов понадобится меньше делящегося вещества для достижения критической массы. Поскольку наибольшее число нейтронов на один поглощенный нейтрон возникает в плутониевом реакторе на быстрых нейтронах (1 МэВ), в режиме воспроизводства лучше использовать плутоний (в реакторе на быстрых нейтронах), чем уран-235 в реакторе на тепловых нейтронах. По той же причине хорошие показатели даст и уран-233 в реакторе на тепловых нейтронах.*

Для советских атомных бомб наши ученые, по загадочному совпадению с заокеанскими физиками, тоже выбрали плутоний-239. Курчатов писал: "Если в действительности эка-осмий (так называли тогда плутоний-239) обладает такими же свойствами, как уран-235, то его можно будет выделить из "уранового котла" и употребить в качестве материала для "эка-осмиевой" бомбы. Бомба будет сделана из "неземного" материала, исчезнувшего на нашей планете" [38].

Почему наши ученые не выбрали торий-урановый цикл? Возможно потому, что добытые советской разведкой сведения о технологии изготовления американских атомных бомб и лимит времени, отпущенный нашими политиками для создания нового оружия, ограничили программу сравнительных исследований всех

делящихся веществ. Поэтому ими сразу был выбран кратчайший путь к цели (к плутонию), уже проверенный бывшими союзниками.