

2. Горшков В.Г. Современные глобальные изменения окружающей среды и возможности их предотвращения. — Докл. Академии наук, сер. Общая биология, 1993, т. 332, № 6, с. 802—806.
3. Бюллетень Европейского ядерного общества. ENS Nucleus, 1992, № 1.
4. Энергетика: цифры и факты. Приложение 2 к Бюллетеню Центра общественной информации по атомной энергии, ЦНИИАтоминформ, 1993.
5. Скиннер Б. Земные ресурсы. М.: Мир, 1989.
6. Феоктистов Л.П. Безопасность — ключевой момент возрождения ядерной энергетики. — Успехи физ. наук, 1993, т. 163, № 8.
7. Сисакян А., Барашенков В. Взрывная идея в атомной энергетике обещает переворот в экономике. — Российские вести, 04.01.94, № 1.
8. Алексеев В.В. Экология и экономика энергетики. М.: Знание, 1990.
9. Иванов Г.А. Наступление века угля, глухая оборона ядерной энергетики. — Наука Урала, 1994, № 3.
10. Волошин Н.П., Ганев А.С., Иванов Г.А., Шибаршов Л.И. О взрывных идеях в ядерной энергетике и их экономике. — Российские вести, 18.05.94.
11. Синев Н.М., Батуров Б.Б. Экономика атомной энергетики. М.: Энергоатомиздат, 1984.
12. Басов Н.Г., Субботин В.И., Феоктистов Л.П. Ядерный реактор с лазерным термоядерным источником нейтронов. — Вестник РАН, 1993, т. 63, № 10.
13. Дьяченко Г.П., Субботин В.И., Басов Н.Г. и др. Гибридная ядерно-термоядерная электростанция. Доклад на 4-й конф. Ядерного общества, Н.-Новгород, 1992.
14. Марвик Ф. Патенты США № 4121969, 1976, № 4216058, 1980.
15. Fetter S., Frolov V., Miller M. e.a. Detecting nuclear warheads. — J. Sci. Global Security, 1990, v. 1.
16. Szoke A., Moir R. A practical route to fusion power. — J. Technology Rev., 1991.
17. Fensermacher D. The effects of nuclear test-ban regimes on third-generation-weapon innovation. — J. Sci. Global Security, 1990, v. 1.
18. Glenn L., Kidder R. Blast loading of a spherical container surrounded by an infinite elastic medium. — J. Appl. Mechanics, 1983, v. 5.
19. Иванов Г.А., Шибаршов Л.И., Баламутов В.Г. и др. Преобразование ядерных боеприпасов и технологий в экологически чистую энергию. — Бюллетень Центра общественной информации по атомной энергии, 1994, № 4.
20. Патент США № 3921405, 1973.
21. Патент Нидерландов № 8002547, 1980.
22. Патент США № 4344911, 1979, № 4569819, 1984.
23. Иванов Г.А., Кузьминых С.Ю., Шибаршов Л.И. Заявка № 93028839 на патент РФ, 1993.

Поступила в Редакцию 22.06.94

УДК 621.039.516.4

СНОВА О ВРЕМЕНИ УДВОЕНИЯ

Ганев И.Х., Орлов В.В. (НИКИЭТ)

Статья Г.А. Иванова и др. содержит интересные оценки расширенного воспроизводства плутония в термоядерных взрывах, инициированных плутониевыми зарядами. Приходится признать, что более чем 40-летние усилия при всех успехах в техническом освоении не привели к технологии быстрых реакторов, приемлемой для массовой энергетики. Это объясняет непрекращающиеся поиски ядерной технологии для будущего и возрождение интереса к ускорительному, гибриднему и взрывному расширенному воспроизводству плутония.

Успех поисков в большой степени зависит от постановки целей, выбора главных критериев. Это нам и хотелось здесь обсудить, поскольку, приняв в качестве главного критерия темпы воспроизводства или время удвоения плутония, авторы рискуют повторить прежние ошибки. Но прежде мы хотели предостеречь от некоторых категорических утверждений («... создание обычной энергетики с реакторами-размножителями практически невозможно...», невозможен «ввод достаточных энерго мощностей в 21-м веке»), для которых в материалах статьи не найдено серьезных оснований.

Действительно, нетрудно подсчитать, что при доступном для быстрых реакторов времени удвоения ~ 10 лет и с учетом плутония, производимого тепловыми реакторами (около 10^{12} Вт), возможен ввод мощностей в 21-м веке, если это потребовалось бы, не только до уровня 10^{14} Вт, но и существенно больше.

Далее, авторы ошибочно принимают известную оценку ресурсов урана в богатых рудах ($\sim 10^7$ т), экономически приемлемых для тепловых реакторов, использующих менее 1% добываемого урана, за ресурсы для энергетики, базирующейся на реакторах-размножителях. Даже при 20%-ном использовании урана становятся приемлемыми его запасы в более бедных рудах, например, в морской воде ($\sim 4 \cdot 10^9$ т). Когда же потери топлива будут намного меньше 2%, а это необходимо по экологическим требованиям, то использование урана будет почти полным, а его ресурсы неограниченными при извлечении даже небольшой части от 10^{14} т урана в земной коре.

При всей неопределенности долговременных прогнозов едва ли следует исходить из предельных оценок обеспечения всех энергией «хотя бы» по нынешней норме США (которая, кстати, будет снижаться) и полного вытеснения обычного топлива. Серьезные прогнозы, учитывающие экономические и социальные реалии, не позволяют рассчитывать на ликвидацию в 21-м веке огромного разрыва в экономическом уровне стран (скажем, душевое потребление электричества в Китае и Индии примерно в 15—30 раз меньше, чем в России), хотя в развитых странах предполагается стабилизация энергопроизводства, а основной его прирост приходится на развивающиеся страны. В качестве более реалистического ориентира можно было бы принять рост ядерных мощностей до 10^{13} Вт к середине и $(2-3)10^{13}$ Вт к концу века, что позволило бы стабилизировать мировое потребление обычного топлива и предотвратить опасное обострение ресурсных, экологических и международных проблем. Расчеты показывают, что такое развитие может быть осуществлено в рамках ресурсов дешевого урана, даже используемого в реакторах-размножителях с КВ ~ 1 .

Проблема короткого времени удвоения возникла в послевоенные десятилетия, когда высокие темпы роста производства энергии экстраполировались и на будущее. Но уже к 70-м годам «энергетический бум» завершился и установились нормальные темпы роста 1—2% в год в развитых и 3—4% в год в развивающихся странах, и возврата к высоким темпам не предвидится. Достижение короткого времени удвоения плутония перестает быть важной целью ядерных разработок, которые теперь могут быть сосредоточены на решении связанных между собой важнейших проблем безопасности и экономичности.

При всех преувеличениях не следует и преуменьшать масштабов аварии на Чернобыльской АЭС, затронувшей судьбы миллионов людей на огромных территориях. Большие аварии потребовали усовершенствования традиционных реакторов для снижения вероятности инцидентов главным образом за счет наращивания инженерных систем и барьеров, ужесточения требований к качеству оборудования и персоналу, что привело и к значительному росту стоимости.

Но ядерная технология едва ли будет признана обычной технологией массового использования, если аварии с катастрофическими выбросами радиоактивности не будут исключены детерминистически за счет не столько инженерных барьеров и требований, сколько присущих реакторам и их компонентам природных законов и качеств. Изучение показывает, что быстрые реакторы позволяют близко подойти к идеалу подобной естественной безопасности, если применять плотное теплопроводное топливо, хорошо удерживающее продукты деления, химически пассивный высококипящий теплоноситель, при КВА ~ 1 уменьшить запас реактивности до $\Delta K_t < \beta_{эф}$, обеспечить высокий уровень естественной циркуляции теплоносителя и саморегулирования обратными связями. В отличие от современных реакторов высокий уровень естественной безопасности достигается не усложнением, а, наоборот, упрощением конструкций, а значит, и удешевлением АЭС. Вспомним, что современные быстрые реакторы не получили широкого применения не потому, что не обеспечивают того или иного времени удвоения, а потому, что оказались намного дороже тепловых.

В духе естественной безопасности должна быть решена и проблема радиоактивных отходов, включая их окончательное захоронение. Эффективное «горение» в спектре

быстрых нейтронов актиноидов и особо долгоживущих продуктов деления (I, Tc) и постепенный радиоактивный распад остальных продуктов деления открывают возможность создания трансмутационного топливного цикла, в котором после достаточно глубокого радиохимического отделения радиоактивных отходов от актиноидов и выдержки в течение ~200 лет их можно будет захоронить, не нарушая природного радиационного уровня, так как по радиационной опасности отходы становятся эквивалентными добываемому из земли урану.

Наконец, важнейшим условием крупномасштабного развития ядерной энергетик является решение проблемы нераспространения совокупностью политических и технологических мер.

По этим критериям: безопасность реакторов, захоронение отходов, экономика, нераспространение — и следовало бы оценивать различные схемы расширенного производства.

Что касается взрывной энергетики с большим единичным энерговыделением, то ее способность обеспечить высокие темпы воспроизводства плутония едва ли будет востребована. Разгон здесь является нормальным режимом, но поведение сотен тысяч тонн натрия в экстремальных аварийных режимах представляет проблему.

Снижение количества радиоактивных отходов в пределах одного порядка с учетом увеличения активации материалов нейтронами упрощает, но не решает проблему отходов. Правда, избыток нейтронов создает предпосылки к трансмутации радионуклидов. Но экономичная радиохимическая технология их выделения из сотен тысяч тонн натрия при низкой концентрации будет, вероятно, трудной задачей.

Одна из проблем разработки любых энергоустановок состоит в снижении неравномерности и цикличности тепловых и механических нагрузок. Во взрывных установках неравномерности максимальны, и это будет приводить к большой материалоемкости по сравнению с обычными реакторами и экономическому проигрышу.

Оптимальная мощность энергоблока, определяемая, кроме экономики, множеством факторов (надежность системы, резервирование на случай остановки блока, потребность в охлаждающей воде, влияние на окружающую территорию и т.д.), оказывается сейчас примерно равной 1 ГВт(эл). Размещение блоков в десятки ГВт столкнется с серьезными трудностями.

Наконец, наличие на АЭС предлагаемого типа производства и складов термоядерных зарядов едва ли будет приемлемым с точки зрения нераспространения.

УДК 621.039.5

КРИТИЧЕСКИЕ ФЛЮКТУАЦИИ ЧИСЛА НЕЙТРОНОВ В РЕАКТОРЕ

*Рязанов В.В. (Институт ядерных исследований АН Украины),
Лакоза Е.Л. (Институт биоорганической химии и нефтехимии АН Украины),
Сысоев В.М. (Киевский государственный университет им. Т.Г. Шевченко)*

Основным и наиболее важным физическим процессом в реакторе является цепная ядерная реакция. В теории флуктуаций цепной реакции деления (нейтронных шумов), разработанной, например, в исследованиях [1—10] и др., получены результаты, важные для физики реакторов и реакторной практики (корреляционный анализ нейтронных шумов для измерения физических характеристик и контроля реактора, устойчивость критического состояния и др.). В настоящей работе для исследования этих задач предлагается применить методы теории непрерывных фазовых переходов и синергетики и использовать аналогии с цепными химическими реакциями и общими закономерностями критических явлений.