

Ценность плутония в развивающейся ядерной энергетике

Брюнин С. В., Корякин Ю. И., Локшин В. Л., Рунин В. И., Чернавский С. Я.

УДК 621.039.003.5.54

Предстоящий рост ядерной энергетике будет сопровождаться значительными качественными изменениями ее структуры: вводами АЭС с быстрыми реакторами и созданием замкнутой по топливу системы, в которой производимое на АЭС вторичное ядерное горючее — плутоний — становится одним из основных видов потребляемых топливных ресурсов. В этих условиях необходимость выбора рациональной стратегии производства и потребления плутония ставит задачу определения его ценности в развивающейся ядерной энергетике.

Передко при технико-экономических расчетах плутоний рассматривается либо с точки зрения только его производства, либо потребления. В первом случае АЭС представляется как двухцелевое производство, и себестоимость плутония определяется разнесением затрат между электроэнергией и производимым плутонием. При этом плутоний рассматривается как товарный продукт системы независимо от способа и эффективности будущего его использования. Во втором случае цена плутония определяется при сопоставлении с ураном в смысле его энергетической и нейтронно-физической эффективности при использовании в реакторе того или иного типа. При этом плутоний рассматривается как источник нейтронов и энергии независимо от способа и затрат на его получение.

Недостатком обоих подходов является рассмотрение АЭС как изолированных объектов (либо производящих, либо потребляющих плутоний), что не дает возможности правильно учесть взаимосвязанность процессов производства и потребления плутония. В результате определенные таким образом показатели плутония не отражают полностью реальных затрат и выгод, связанных с производством и потреблением плутония, и в конечном итоге его народнохозяйственной ценности.

Цикл производства, переработки и потребления плутония связывает все атомные электростанции и предприятия внешнего топливного цикла в единую ядерно-энергетическую систему. Поэтому целесообразно рассматривать ценность плутония как системное понятие и определять ее исходя из предпосылки, что плутоний в ядерно-энергетической системе является сугубо внутренним как продуктом, так и ресурсом. В ней он производится и потребляется и вне

ядерной энергетике не имеет потребительной стоимости.*

Вследствие развития ядерной энергетике и развертывания процесса производства и потребления плутония во времени, ценность плутония обладает свойствами динамической характеристики, т. е. может изменяться во времени.

Системный подход к задаче о ценности плутония позволяет более корректно определить технико-экономические характеристики отдельных АЭС и предприятий внешнего топливного цикла и при соответствующих технических предпосылках выбрать оптимальную производительность и режим наработки плутония на АЭС в течение срока ее эксплуатации.

В дальнейшем рассмотрим замкнутую по плутонию ядерную энергетике, т. е. такую систему, которая не обменивается плутонием с другими системами. При этом условии плутоний, будучи промежуточным продуктом, циркулирует внутри системы.

Ценность плутония в системе является функцией стоимости конечной продукции ядерно-энергетической системы — электроэнергии — и равна частной производной от минимума суммарных затрат в системе (при заданном выпуске электроэнергии) по количеству плутония, функционирующего в ней. Другими словами, ценность плутония отражает реакцию ядерно-энергетической системы (сбалансированной по плутонию) в денежном выражении на возникновении дисбаланса плутония, функционирующего в этой системе. При правильном учете внешних связей ядерной энергетике ценность плутония может быть определена из анализа системы ядерной энергетике, включающей в себя весь комплекс предприятий от добычи природного урана до производства электроэнергии.

Важнейшая цель планирования ядерной энергетике — определение такой ее структуры, которая бы обеспечила минимум народнохозяйственных затрат на систему при реализации требуемого выпуска продукции — электроэнергии. При этом количественное выражение

* Речь идет о реакторном энергетическом плутонии, производящемся и потребляющемся в значительном количестве.

ценности плутония выступает как одно из управляющих средств, а определение ценности плутония является одной из задач оптимального планирования ядерной энергетики и может быть сформулировано так: найти такую количественную оценку ценности плутония, которая характеризует оптимальную в указанном выше смысле систему ядерной энергетики при имеющихся ограничениях на ее развитие.

Подход к определению ценности плутония как системной характеристики принят в работах [1, 2], при этом структура развивающейся ядерной энергетики предварительно задавалась без ее оптимизации. Для ряда специфических структур ядерной энергетики США оценка ценности плутония получена в работе [3].

В наиболее общем виде вопросы оптимизации народнохозяйственных систем и определения ценности ресурсов рассмотрены Л. В. Конторовичем, В. С. Немчиновым, В. В. Новожиловым и обобщены в работах [4, 5].

В настоящей работе для решения поставленной задачи использована линейная математическая модель ядерной энергетики, описанная в [6], анализ которой проводился методом линейного программирования.

Решалась следующая задача: в расчетном периоде от $t = 1$ до $t = T$ найти вектор x^0 (где x характеризует определенную последовательность вводов АЭС) такой, чтобы функционал

$$(C, x) \rightarrow \min \quad (1)$$

при ограничениях:

$$Ax = b. \quad (2)$$

В выражении (1) C — вектор приведенных затрат, каждая компонента которого характеризует полные приведенные затраты на строительство и эксплуатацию соответствующих компонент вектора структуры x , а выражение в скобках — скалярное произведение. В выражении (2) A — матрица технологических коэффициентов, а b — вектор ограничений. Таким образом, коэффициенты матрицы характеризуют участие соответствующей компоненты x в одном из ограничений. Среди таких ограничений, как балансы (по годам расчетного периода) мощности, производимой электроэнергии и потребления природного урана, в модели присутствовали динамические ограничения, связывающие производство и потребление плутония компонентами структуры. Задаче, сформулированной функционалом (1) при ограничениях (2), соответствует, как известно, такая двойственная задача линейного программирования:

найти такой вектор оценок y^0 , чтобы

$$(y, b) \rightarrow \max \quad (3)$$

при

$$Ay \leq C. \quad (4)$$

Из (3) и (4) видно, что вектор оценок y является вектором оценок потребляемых и производимых ресурсов.

По известной теореме линейного программирования

$$(C, x^0) = (y^0, b). \quad (5)$$

Из (5) следует, что плутониевая компонента вектора y^0 является искомой динамической ценностью плутония (ее замыкающей оценкой) и ее определение предусматривается используемыми программами для решения задачи линейного программирования.

Одним из основных факторов, влияющих на определяемую ценность плутония, является производительность АЭС. При существующих технических предпосылках производительность АЭС по плутонию может меняться в весьма широких пределах. В этой связи в рамках задачи определения ценности плутония возникает необходимость определить оптимальную производительность АЭС. Оптимальная производительность по плутонию ядерных реакторов с определенной технологией обусловлена снижением глубины выгорания и увеличением количества первичного ядерного горючего, вовлекаемого в топливный цикл при увеличении наработки плутония, а также соотношением ценности плутония и стоимости первичного ядерного горючего.

Задача об оптимальной производительности может решаться на двух иерархических уровнях: рассмотрением в системе ядерной энергетики атомных электростанций, имеющих широкий диапазон производительности, и путем анализа технико-экономических показателей отдельной АЭС с учетом динамической ценности плутония для системы ядерной энергетики.

В задачу первого уровня входит предварительное определение оптимальной производительности АЭС, в задачу второго — уточнение этой производительности при рассмотрении возможных изменений режима наработки в течение срока эксплуатации и оптимизация параметров ядерных реакторов и АЭС, обеспечивающих оптимальную производительность.

Ниже изложены некоторые результаты расчетов ценности делящегося плутония в системе ядерной энергетики при различных предположениях относительно ее будущего развития.

В числе прочих рассматривались варианты двухкомпонентной структуры ядерной энергетики, состоящей из тепловых реакторов на уране (ТР) и тепловых реакторов на плутонии (ТРП), тепловых реакторов на уране (ТР) и быстрых реакторов-размножителей (БРР). В последнем случае варьировался год начала широкого ввода быстрых реакторов, а также объем вовлекаемых запасов природного урана. Эти варианты наиболее показательны для анализа ценности плутония.

Всетеловая гипотеза развития ядерной энергетики при отсутствии потребления плутония не рассматривалась ввиду очевидности ее решения в данной задаче (ценность плутония в такой системе равна нулю). Расчеты проводились на математической модели, описание которой дано в [6], расчетный период с 1980 по 2000—2010 гг.

При использовании плутония в качестве ядерного горючего в тепловых реакторах плутоний получает положительную оценку, которая при сохранении условий функционирования АЭС в системе постоянна на протяжении расчетного периода. Эффект использования плутония в этом случае состоит в снижении суммарных приведенных затрат по ядерной энергетике и уменьшении расхода природного урана по сравнению с тепловой моделью без возврата плутония в топливный цикл. Величины этих эффектов относительно малы (до 10%).

Наибольший интерес представляет анализ ценности плутония в двухкомпонентной структуре ядерной энергетики с быстрыми реакторами.* Расчеты показывают, что ценность плутония зависит от эффективности использования быстрых реакторов-размножителей в системе ядерной энергетики, которая в свою очередь определяется их годом ввода и технико-экономическими показателями.

На рис. 1 показано качественное влияние относительного преувеличения капиталовложений в быстрые реакторы по сравнению с тепловыми реакторами (α) на долю БРР в системе и ценность плутония при фиксированном годе ввода их в систему. Действие фактора α на структуру ядерной энергетики не проявляется, конечно, изолированно, а зависит и от других факторов, важнейшими из которых являются коэффициент воспроизводства быстрых реакторов-размножителей, возможные ограничения на ресурсы (или стоимость при-

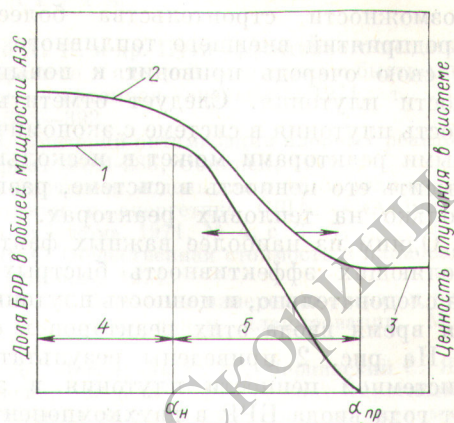


Рис. 1. Характер влияния относительного удорожания БРР на их долю в общей мощности АЭС (1) и ценность плутония в системе (2); ценность плутония при использовании только в тепловых реакторах (3); область несущественности влияния α (4); область существенных значений α (5).

родного урана) и время внешнего топливного цикла. Можно выделить два характерных значения α : α_n и $\alpha_{пр}$. Область изменения $1 \leq \alpha \leq \alpha_n$ характеризуется несущественным влиянием относительного удорожания БРР на долю их в общей мощности АЭС. В этой области изменения α АЭС с быстрыми размножителями, безусловно, эффективны, и их ввод определяется техническими возможностями и ограничениями по плутонию. Однако ценность плутония несколько снижается с увеличением относительных капиталовложений в быстрые реакторы. Если величина α находится в области $\alpha_n \leq \alpha \leq \alpha_{пр}$, доля БРР уменьшается с увеличением α . Величина $\alpha_{пр}$ характеризует предельный уровень конкурентоспособности АЭС с быстрыми реакторами-размножителями.

При увеличении α ценность плутония, естественно, падает и при $\alpha_{пр}$ равна нулю, если плутоний не используется в тепловых реакторах, или величине, соответствующей ценности в тепловой гипотезе с использованием плутония, описанной выше. Чем больше масштаб развития ядерной энергетики, тем больше сказывается влияние величины α на структуру и потребность в уране, поскольку «вес» быстрых реакторов увеличивается и система становится более чувствительной к величине фактора α .

Снижение капиталовложений в быстрые реакторы, приводящее к увеличению доли быстрых реакторов, способствует также снижению затрат на переработку плутония из-за

* В данной статье не рассматривался вопрос о быстрых реакторах-конвертерах, носящий самостоятельный характер и требующий отдельного обсуждения.

возможности строительства более крупных предприятий внешнего топливного цикла. Это в свою очередь приводит к повышению ценности плутония. Следует отметить, что ценность плутония в системе с экономичными быстрыми реакторами может в несколько раз превысить его ценность в системе, развивающейся только на тепловых реакторах.

Одним из наиболее важных факторов, определяющих эффективность быстрых реакторов (а следовательно, и ценность плутония), является время ввода этих реакторов в систему.

На рис. 2 приведены результаты расчетов системной ценности плутония в зависимости от года ввода БРР в двухкомпонентной структуре. Из рисунка следует, что, хотя до ввода быстрых реакторов плутоний в системе не потребляется, его ценность в этот период не равна нулю, поскольку предполагается его использование в расчетном периоде. По мере приближения к началу использования ценность плутония растет (со скоростью, определяемой коэффициентом дисконтирования затрат) и достигает максимальной величины в момент наибольшей дефицитности. Более поздний ввод быстрых реакторов-размножителей приводит к снижению ценности плутония в начальные периоды времени, что видно из

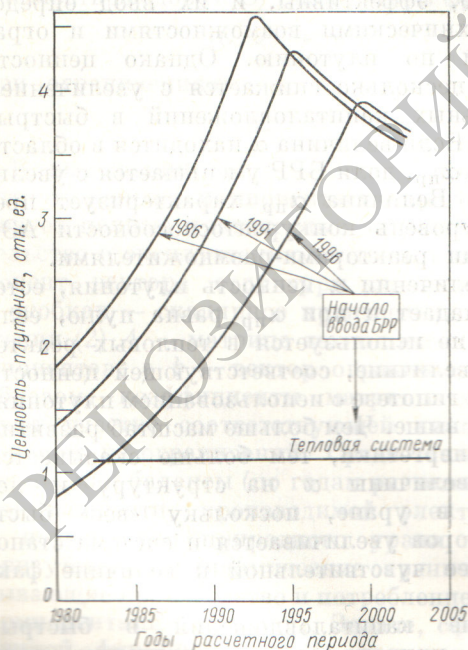


Рис. 2. Влияние начала ввода БРР на ценность плутония в системе ядерной энергетики.

Рис. 3. Влияние ограничений по урану на ценность плутония в системе ядерной энергетики при вводе БРР с 1986 г.

— — — — — без ограничений;
 — — — — — с ограничениями на потребление до 2000 г.

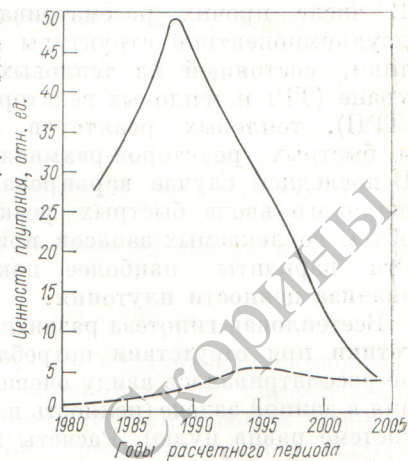


рис. 2. При этом вследствие значительного периода накопления отодвигается момент наибольшей дефицитности плутония и снижается абсолютное значение максимальной ценности.

Важнейшими факторами, определяющими значение ценности плутония, являются экономические показатели производства урана и его запасы. Как показывают расчеты (рис. 3), даже незначительные ограничения на потребление урана в системе ядерной энергетики приводят к увеличению абсолютных значений ценности в несколько раз.

Анализ изменения ценности плутония в системе развивающейся ядерной энергетики позволяет сделать следующие выводы:

- при наличии в системе в расчетный период быстрых реакторов-размножителей использование плутония в тепловых реакторах, как правило, нецелесообразно;

- ценность плутония как замыкающая оценка может использоваться при определении технической политики в развитии средств, производящих, перерабатывающих и потребляющих плутоний;

- повышение ее значения в период, предшествующий широкому вводу быстрых размножителей, указывает на возможность и допустимость в этот период более высоких прямых затрат на производство и переработку плутония;

- высокие значения ценности плутония в системе с двухкомпонентной структурой (ТР + БРР) особенно в случае раннего ввода быстрых реакторов и значительной их доли ($\alpha \leq \alpha_n$) указывают на целесообразность повышенной наработки плутония тепловыми реакторами в период, предшествующий широкому вводу в систему быстрых реакторов. Техниче-

ски эта задача, по-видимому, может быть решена с помощью канальных уран-графитовых реакторов, обладающих гибким топливным циклом. Увеличению наработки плутония в таких реакторах может способствовать также использование плотного горючего на основе металлического урана;

— в связи с динамическим характером ценности плутония в системе с двухкомпонентной структурой правомерна постановка задачи о меняющейся по годам прогнозируемого периода производительности теплового реактора, нарабатывающего плутоний. Оптимальная производительность такого реактора должна определяться на основании ценности плутония в системе.

Поступила в Редакцию 2/VII 1973 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лейпунский А. И. и др. Пути эффективного использования горючего в ядерной энергетике с быстрыми реакторами. — «Атомная энергия», 1971, т. 31, вып. 4, с. 383—392.
2. Орлов В. В. Критерий оптимизации ядерных реакторов. Препринт ФЭИ-286, Обнинск, 1971.
3. Деониги Д. Расчетная модель для оценки роли ядерной энергетике в энергетике США. — «Атомная техника за рубежом», 1971, № 4, с. 3—7.
4. Немчинов В. С. Общественная стоимость и плановая цена. М., «Наука», 1971.
5. Повожиллов В. В. Проблемы измерения затрат и результатов при оптимальном планировании. М., «Наука», 1972.
6. Вирцер А. Д., Левенталь Г. Б., Чернавский С. Я. Математическая модель долгосрочного прогнозирования развития ядерной энергетике по экономическому критерию. — «Атомная энергия», 1972, т. 33, вып. 6, с. 955—960.

Рефераты статей, опубликованных в настоящем выпуске

УДК 621.039:621.039.311.2

Абрамов В. М., Бондаренко А. В., Ваймугин А. А., Гуревич Л. В., Долгов В. В., Комиссаров О. В., Минашин М. Е., Николенко П. А., Симонов А. Л., Сосенков Г. А., Стрельцов Е. И., Суворов А. И., Суворов А. П., Харизоменов Ю. В., Шаравов В. Н. Билибинская атомная электростанция. — «Атомная энергия», 1973, т. 35, с. 299.

Описано сооружение первой советской заповарной атомной теплоэлектростанции — Билибинской АТЭЦ. Суммарная электрическая мощность АТЭЦ составляет 48 Мвт, отпуск тепла в виде горячей воды до 100 Гкал/ч. Принципиальная особенность АТЭЦ — использование естественной циркуляции теплоносителя. Применен канальный графито-водяной реактор с трубчатыми тепловыделяющими элементами. (5 рис., 5 библиографических ссылок.)

УДК 621.039.003.5.54

Брунин С. В., Корякин Ю. И., Локшин В. Л., Рунин В. И., Чернавский С. Я. Ценность плутония в развивающейся ядерной энергетике. — «Атомная энергия», 1973, т. 35, с. 305.

В статье рассмотрен подход к определению ценности плутония в системе развития и стоимости электроэнергии в системе. Проводится анализ ценности плутония в ядерной энергетике, имеющей разную структуру, срок ввода и экономические показатели быстрых реакторов-размножителей. Рассмотрено влияние ограничений на добычу урана, на ценность плутония в ядерной энергетике. Сделан ряд качественных выводов о целесообразности развития добытки и потребления плутония. (3 рис., 6 библиографических ссылок.)

УДК 621.039.5.17.5

Букша Ю. К., Баджаров Ю. Е., Кузнецов И. А. Искажение температурного поля активной зоны быстрого реактора при нарушении тепловода в топливных пакетах. — «Атомная энергия», 1973, т. 35, с. 311.

В статье рассмотрена аварийная ситуация в активной зоне быстрого реактора, связанная с уменьшением расхода натрия через один или группу пакетов. Рассчитан поля температур в реакторе. (3 рис., 2 библиографические ссылки.)

УДК 621.039.519:621.039.55

Пасечник В. М., Рудик А. Ф., Красик Ю. И., Ломakin С. С., Куликов В. И., Шеленин А. В., Панфилов Г. Г. Исследование нейтронных характеристик активной зоны реактора ВВР-М. — «Атомная энергия», 1973, т. 35, с. 315.

С помощью малогабаритных камер деления с радиаторами из ^{232}Th и смеси ^{235}U и ^{232}Th и активационных детекторов исследованы нейтронные поля в активной зоне реактора ВВР-М. В качестве детекторов использовались фольги из золота, меди, кобальта и сплавов алюминия с лютецием или европием.

Измерения проводились в центральных отверстиях твэлов, в сухих каналах и водных полостях активной зоны реактора. Определены относительные распределения тепловых нейтронов, спектральные характеристики, абсолютные плотности потока тепловых нейтронов и температура нейтронов.

Полученные данные использованы для компоновки новой активной зоны, позволившей улучшить эксплуатационные характеристики реактора и более эффективно проводить исследовательские работы. (4 рис., 2 табл., 4 библиографические ссылки.)

УДК 621.039.515

Филипчук Е. В., Потапенко П. Т., Косилов А. Н. Устойчивость системы регулирования распределения мощности в реакторе. — «Атомная энергия», 1973, т. 35, с. 317.

Рассматривается задача об автоматическом регулировании радиального распределения мощности в реакторе. Для обеспечения контроля и регулирования зона реактора с компенсирующими стержнями разбивается на n одинаковых ячеек, каждая из которых имеет в центре области датчик потока нейтронов. В таких ячейках содержится одинаковое число стержней, движущихся в процессе работы синхронно.

Приведена инженерная методика анализа устойчивости системы регулирования распределения мощности в реакторе. Методика распространена на случай, когда интегральная мощность реактора стабилизируется специальным быстродействующим регулятором.

Анализируется влияние на устойчивость числа локальных регуляторов и их геометрического расположения в активной зоне. (4 рис., 2 табл., 7 библиографических ссылок.)

УДК 621.039.54

Агеев А. Т., Бибиков С. Е., Валув Е. М., Новоселов Г. П., Савельев В. Ф. Термическое вскрытие окисных твэлов с циркониевой оболочкой. — «Атомная энергия», 1973, т. 35, с. 323.

Для вскрытия и разделения топливных и конструктивных материалов окисные твэлы с циркониевыми оболочками сплавлены в графитовом тигле с присадками железа и меди (10—20 вес.%) при температуре 1050—1320°С в инертной среде. Металлический расплав Zr, Fe и Cu, обладающий высокой текучестью, отделяет от горючего декантацией. Выход циркония в слиток 93—98%, содержание урана в слитке 0,1—0,2 вес.%. Брикет двуокиси урана, отделенный от расплава, разрушается при нагревании на воздухе до 400—450°С с образованием порошка закиси-оксида урана (1—10 мк) и кусочков сплава (1—3 мм).

Вскрытие твэлов в циркониевой оболочке сплавлением с присадками Fe и Cu может быть применено в качестве головной операции в экстракционном, фторидо-газовом и других процессах регенерации горючего энергетических реакторов. (2 рис., 2 табл., 4 библиографические ссылки.)