

# ВЛИЯНИЕ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ СВИНЦА ТОРИЕВЫХ РУД НА ПУСТОТНЫЙ ЭФФЕКТ РЕАКТИВНОСТИ В РЕАКТОРЕ ТИПА БРЕСТ

**В.С. Окунев**

*Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана,  
г. Москва*



Свинцово-охлаждаемые быстрые реакторы – одна из концепций энергетических реакторов нового поколения (Generation-IV). Для реакторов со свинцовым охлаждением (например, БРЕСТ) достижимы идеалы естественной безопасности. В реакторах такого типа предполагается использовать природный свинец изотопного состава 1,4%  $^{204}\text{Pb}$  – 23,6%  $^{206}\text{Pb}$  – 22,6%  $^{207}\text{Pb}$  – 52,4%  $^{208}\text{Pb}$ .

Существуют потенциальные резервы концепции «БРЕСТ», связанные с дальнейшим повышением внутренне присущей безопасности (если потребуются). Это актуально для энергоблоков большой мощности. Среди таких резервов – использование свинца с высоким содержанием изотопа  $^{208}\text{Pb}$ . Разделение изотопов свинца – дорогостоящая процедура. Однако известно, что  $^{208}\text{Pb}$  – конечный продукт распада  $^{232}\text{Th}$ . Период полураспада тория  $1,4 \cdot 10^{10}$  лет, следовательно, около 20% тория уже распалось в  $^{208}\text{Pb}$ . В качестве теплоносителя быстрых реакторов можно использовать свинец торогенного происхождения.

Выбор предпочтительных месторождений свинца и оптимизация изотопного состава свинца (как теплоносителя быстрых реакторов) представляет интерес для крупномасштабной ядерной энергетики будущего, основанной на безопасных реакторах.

## ВОЗМОЖНЫЕ РЕЗЕРВЫ КОНЦЕПЦИИ БРЕСТ

Быстрые реакторы со свинцовым теплоносителем – одна из концепций реакторов нового поколения (Generation-IV), в рамках которой возможно достижение идеалов естественной безопасности. Однако при увеличении мощности энергоблока увеличивается пустотный эффект реактивности (ПЭР), что связано с уменьшением утечки нейтронов из центральной части активной зоны. При проектировании быстрых реакторов с жидкометаллическим теплоносителем проблеме ограничения или минимизации ПЭР, как одного из значимых факторов опасности, уделяют особое внимание.

Для РУ БРЕСТ-2400 В.В. Орловым предложена ленточная форма активной зоны, что способствует снижению ПЭР в реакторе большой мощности до безопасного уровня, но прежде чем радикально изменить форму активной зоны (при переходе к реакто-

ру большой мощности), необходимо тщательно проанализировать потенциальные резервы концепции БРЕСТ [1], связанные, в первую очередь, с обеспечением безопасности. В числе резервов – возможность минимизации ПЭР при использовании в качестве теплоносителя  $^{208}\text{Pb}$  (или свинца с большой концентрацией изотопа  $^{208}\text{Pb}$ ).

Широкие возможности в улучшении нейтронного баланса, повышении безопасности быстрых реакторов, а также в решении проблемы трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов (прежде всего младших актинидов с четным числом нейтронов) открывает использование теплоносителя на основе изотопа  $^{208}\text{Pb}$ . Ядра  $^{208}\text{Pb}$  – дважды магические. Они отличаются повышенной устойчивостью и, следовательно, меньшей активируемостью в активной зоне. Неупругие процессы на ядрах  $^{208}\text{Pb}$  реализуются с меньшей вероятностью, чем на других стабильных изотопах свинца, т.е.  $^{208}\text{Pb}$  хуже поглощает и хуже замедляет (за счет неупругого рассеяния) нейтроны. Худшее замедление нейтронов (на ядрах  $^{208}\text{Pb}$ ) позволит интенсифицировать пороговое деление тяжелых нуклидов с четным числом нейтронов ( $^{237}\text{Np}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{243}\text{Am}$  и др.) за счет ужесточения спектра реактора и минимизировать пустотный и плотностной эффекты реактивности при использовании теплоносителя на основе изотопа  $^{208}\text{Pb}$ .

### ПОЛУЧЕНИЕ $^{208}\text{Pb}$

Обогащение свинца изотопом  $^{208}\text{Pb}$  – дорогостоящая операция, препятствующая крупномасштабному использованию такого теплоносителя в энергетике. В зависимости от происхождения свинец может иметь различный изотопный состав. Для охлаждения реакторов типа БРЕСТ предполагается использовать свинец, представляющий собой смесь четырех стабильных изотопов: 1,4%  $^{204}\text{Pb}$  – 23,6%  $^{206}\text{Pb}$  – 22,6%  $^{207}\text{Pb}$  – 52,4%  $^{208}\text{Pb}$  [2].

Изотоп  $^{204}\text{Pb}$  имеет нерадиологическое происхождение, изотопы  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$  и  $^{208}\text{Pb}$  – радиологическое: это последние (стабильные) нуклиды природных радиоактивных рядов урана-радия, урана-актиния и тория соответственно. К настоящему времени приблизительно 1/5 часть  $^{232}\text{Th}$  распалась в  $^{208}\text{Pb}$ . Таким образом, привлекательна возможность выделения свинца с большим содержанием изотопа  $^{208}\text{Pb}$  при добыче ториевых руд [3].

Природный уран состоит в основном из двух изотопов:  $^{235}\text{U}$  (0,72%) и  $^{238}\text{U}$  (99,28%) – родоначальников радиоактивных рядов. Поэтому урановые руды содержат свинец с высокой концентрацией изотопа  $^{206}\text{Pb}$  и гораздо меньшей –  $^{207}\text{Pb}$ . В природе торий встречается в виде минералов вместе с ураном [4], следовательно, сопутствующим продуктом ториевых руд будет смесь изотопов  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$  и  $^{208}\text{Pb}$  с большой концентрацией последнего (до 98% [5]).

В связи с тем, что изотопный состав свинца, содержащегося в ториевых и урановых рудах, может варьироваться в широких пределах, актуальна проблема выбора предпочтительных месторождений.

В ториевых рудах содержание  $\text{ThO}_2$  может достигать 77 (торит) и 90–93% (торианит). Примеси урана – незначительны. Побочный продукт таких месторождений тория – свинец с высоким содержанием  $^{208}\text{Pb}$ . Основным источником тория – монацит (минерал с содержанием  $\text{ThO}_2$  до 12%).

Радиогенный свинец содержат небольшие примеси изотопа  $^{204}\text{Pb}$ , не связанного с радиоактивным распадом. Свинец разных эпох имеет различный изотопный состав: свинец более древних эпох содержит пониженное количество изотопов, имеющих радиологическое происхождение ( $^{207}\text{Pb}$ ,  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ ), а в свинце более молодых эпох их количество увеличено относительно  $^{204}\text{Pb}$ . Однако отношение элементов  $\text{Pb}:\text{U}:\text{Th}$  может изменяться со временем не только вследствие радиоактивного распада. Это

характерно для относительно молодых геологических формаций. Статистика по некоторым пробам Украинского щита (по данным [5]) представлена на рис. 1.

Основная руда свинца – галенит (свинцовый блеск) – составная часть полиметаллических (свинцово-цинковых) руд с содержанием свинца и цинка – от нескольких до 10% и более. Содержание изотопа  $^{208}\text{Pb}$  в свинце этих руд – 52,4%. Таким образом, привлекательность ториевых руд для получения свинца с высоким содержанием  $^{208}\text{Pb}$  очевидна, экономический выигрыш огромен: если в богатых полиметаллических рудах, например, содержится 5% свинца с 52,4-процентным содержанием  $^{208}\text{Pb}$ , т.е. около 2,5%  $^{208}\text{Pb}$ , выделение которого потребует изотопного разделения, то даже в бедных торием (и значит, сопутствующим его свинцом) минералах – монацитах – содержится около 1% свинца, почти полностью состоящего из изотопа  $^{208}\text{Pb}$ , выделение которого практически не требует изотопного разделения.

Богатые торием монацитовые россыпи есть в Бразилии, Индии, США, Австралии, Малайзии. Монациты содержатся в россыпях на огромных пространствах побережий

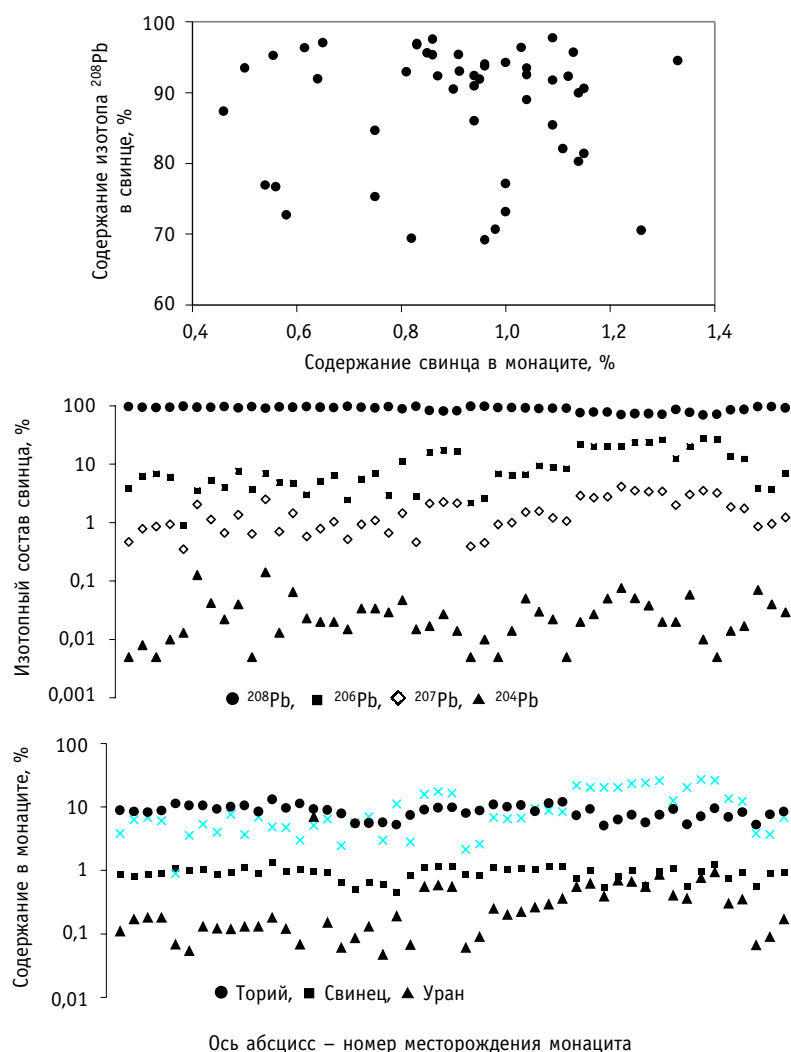


Рис. 1. Статистика по месторождениям монацита (анализ 49 проб Украинского щита): зависимость содержания изотопа  $^{208}\text{Pb}$  в свинце от содержания свинца в монаците; изотопный состав свинца и содержание тория, урана и свинца в монаците

Индийского, Тихого и Атлантического океанов. Месторождения тория есть и в России.

Однако при выборе предпочтительных месторождений свинца следует учитывать следующие соображения. В галенитах, наряду с нерадиоактивным свинцом ( $^{204}\text{Pb}$ ), всегда присутствуют изотопы  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$  и  $^{208}\text{Pb}$ , образовавшиеся в результате радиоактивного распада урана и тория. Пока свинец, уран и торий находятся в литосфере в рассеянном состоянии, происходит постоянное пополнение свинца его радиоактивными изотопами. В этапы тектоно-магматической активизации, сопровождаемые палингенезисом (образованием магмы в результате полного или частичного плавления горных пород в глубинных зонах Земли), происходит дифференциация свинца, урана и тория [6]. Свинец концентрируется в ультраосновной и основной частях возникающих расплавов, тогда как уран и торий – в гранитоидной их составляющей. Торий концентрируется в минералах, уран уходит с гидротермальными растворами, зачастую накапливается в осадочных толщах, легко выщелачиваясь подземными водами [6].

Таким образом, для получения свинца, который предполагается использовать в качестве теплоносителя, жилые месторождения (юг Африки) тория могут оказаться более предпочтительными. Месторождения «невыносных» монацитов в России есть в районе Новокузнецка и Томска, выносные россыпи монацитовых песков – на Дальневосточном побережье. Торит и торианит считаются промышленными минералами тория, но их доля в мировом производстве этого элемента незначительна.

Выбор наиболее предпочтительных месторождений свинца с высоким содержанием изотопа  $^{208}\text{Pb}$  можно сделать, например, на основе решения дискретной многокритериальной задачи [7]. В качестве критериев (целевых функционалов) задачи можно рассматривать содержание свинца в руде и содержание изотопов  $^{204}\text{Pb}$ ,  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$  и  $^{208}\text{Pb}$  в свинце. Объекты задачи – месторождения тория (рис. 1).

Очевидно необходимо максимизировать содержание свинца в руде и концентрацию изотопа  $^{208}\text{Pb}$  в свинце, одновременно минимизируя содержание  $^{207}\text{Pb}$  в свинце. (Число нейтронов в ядре  $^{207}\text{Pb}$  125, т.е. предшествует магическому числу, соответствующему полностью заполненной нейтронной оболочке. В итоге  $^{207}\text{Pb}$  среди всех прочих стабильных изотопов свинца обладает максимальным сечением присоединения нейтрона – максимальным сечением неупругих процессов – поглощения и неупругого рассеяния. Значит при использовании теплоносителя на основе свинца с большим содержанием  $^{207}\text{Pb}$  следует ожидать максимальный ПЭР). Изотопы свинца  $^{204}\text{Pb}$  и  $^{206}\text{Pb}$  с четным числом нейтронов, благодаря эффекту спаривания, обладают меньшими сечениями неупругих процессов, чем  $^{207}\text{Pb}$ , и большими, чем дважды магические ядра  $^{208}\text{Pb}$ . Таким образом, в радикальной минимизации содержания изотопов  $^{204}\text{Pb}$  и  $^{206}\text{Pb}$  в теплоносителе нет необходимости. Их минимизация имеет смысл, если реализуется за счет увеличения доли дважды магического изотопа  $^{208}\text{Pb}$  в свинце. Если же уменьшение доли  $^{204}\text{Pb}$  и  $^{206}\text{Pb}$  идет за счет увеличения концентрации  $^{207}\text{Pb}$ , содержание изотопов  $^{204}\text{Pb}$  и  $^{206}\text{Pb}$  в свинце, наоборот, следует максимизировать, т.е. целевые функционалы можно рассматривать с весовыми коэффициентами, определяемыми субъективно (лицом, принимающим решение). В этом случае весовые коэффициенты, отражающие значимость критериев, для концентраций  $^{204}\text{Pb}$  и  $^{206}\text{Pb}$  будут меньше, чем для концентраций  $^{207}\text{Pb}$  и  $^{208}\text{Pb}$ .

Исходя из статистики ториевых месторождений (рис. 1), можно считать, что концентрация изотопа  $^{204}\text{Pb}$  в свинце, полученном из разных проб не превышает 0,1%. Содержание изотопа  $^{207}\text{Pb}$  в свинце монацитов 0,35–4,11%. Можно пренебречь содержанием изотопа  $^{204}\text{Pb}$  в свинце, включив его в долю  $^{206}\text{Pb}$  (предполагая, что эти изотопы обладают приблизительно одинаковыми ядерно-физическими свойствами).

Серия проб (рис. 1) характеризуется относительно небольшой долей  $^{207}\text{Pb}$  в свинце (до 1%). Можно считать, что доля изотопа  $^{207}\text{Pb}$  в свинце монацитов постоянна и равна

1%. Тогда для месторождений с минимальной концентрацией  $^{207}\text{Pb}$  в свинце такое предположение будет соответствовать консервативной оценке при расчете ПЭР.

Итак, содержание изотопа  $^{204}\text{Pb}$  в свинце можно не учитывать, а требование минимизации доли  $^{207}\text{Pb}$  заменить ограничением типа «равенство» (или «не более» – в общем случае). В результате, если в качестве потенциального теплоносителя рассматривать свинец ториевых руд, исходную задачу с пятью критериями можно свести к двухкритериальной: на максимум содержания свинца в руде и изотопа  $^{208}\text{Pb}$  в свинце. Тогда при постоянной концентрации  $^{207}\text{Pb}$  в свинце, максимизация доли  $^{208}\text{Pb}$  в свинце возможна за счет минимизации доли  $^{206}\text{Pb}$ .

Задача ранжирования месторождений тория (торогенного свинца) по степени предпочтительности и выбора наиболее предпочтительного (предпочтительных) месторождения решена с помощью метода смещенного идеала [8] на примере анализа проб Украинского щита. Наиболее предпочтительное месторождение имеет следующие характеристики: содержание свинца в руде 1,09%, изотопный состав свинца – 0,013%  $^{204}\text{Pb}$  – 0,89%  $^{206}\text{Pb}$  – 0,35%  $^{207}\text{Pb}$  – 97, 74%  $^{208}\text{Pb}$ . Содержание тория в руде 11,26%, урана 0,068%.

Можно переформулировать задачу, переходя от задачи оптимизации изотопного состава свинцового теплоносителя к задаче минимизации ПЭР в реакторе. В такой постановке критерии оптимальности и ограничения задачи оптимизации изотопного состава переходят в разряд управляющих параметров задачи минимизации ПЭР. Изотопный состав свинца можно учесть двумя управлениями: доля  $^{206}\text{Pb}$  и  $^{208}\text{Pb}$  в свинце. Доля изотопа  $^{207}\text{Pb}$  предполагается постоянной и не изменяется в процессе оптимизации, следовательно, не является управлением (относится к разряду исходных данных). В общем случае ограничение, соответствующее условию: доля  $^{207}\text{Pb}$  не более 1%, – можно рассматривать как неопределенность исходной информации. Долю изотопа  $^{204}\text{Pb}$  в свинце также можно фиксировать и рассматривать в качестве заданной (в разряде исходных данных), либо включить концентрацию  $^{204}\text{Pb}$  в долю  $^{206}\text{Pb}$  в свинце.

Анализ проб Украинского щита [5] показывает, что свинец урановых руд – циркона и уранинита, – характеризуется высокой концентрацией изотопа  $^{206}\text{Pb}$ : до 72 и 86% соответственно. Доля  $^{207}\text{Pb}$  невелика (около 7–13% в свинце). Содержание дважды магического изотопа  $^{208}\text{Pb}$  в свинце циркона 12–46%, уранинита – около 3%, т.е. намного меньше, чем в типичных галенитах. Уранинит характеризуется высоким содержанием урана – 51,5% и, следовательно, свинца (до 17%). Изотопа  $^{204}\text{Pb}$  в свинце урановых руд пренебрежимо мало (не более 0,32%).

Вследствие эффекта спаренности нуклиды с четным числом нейтронов обладают меньшим сечением присоединения нейтрона (сечениями неупругих процессов) по сравнению с  $^{207}\text{Pb}$ . Основная проблема использования теплоносителя на основе свинца, извлеченного из урановых руд, – относительно (по сравнению с ториевыми рудами) высокое содержание  $^{207}\text{Pb}$  (около 10%) при низкой доле  $^{208}\text{Pb}$  (из-за примесей тория в урановых рудах), что приводит к увеличению ПЭР. По ядерно-физическим свойствам нуклиды  $^{204}\text{Pb}$  и  $^{206}\text{Pb}$  занимают промежуточное положение между  $^{207}\text{Pb}$  и  $^{208}\text{Pb}$ . В результате ПЭР в реакторе, охлаждаемым свинцом, извлеченным из урановых руд, немного хуже, чем при использовании природного свинца изотопного состава 1,4%  $^{204}\text{Pb}$  – 23,6%  $^{206}\text{Pb}$  – 22,6%  $^{207}\text{Pb}$  – 52,4%  $^{208}\text{Pb}$  (табл. 1).

## ПРОБЛЕМА УТИЛИЗАЦИИ ТОРИЯ

При разработке ториевых руд с целью получения свинца возникнет проблема утилизации тория. С такой проблемой человечество уже сталкивалось в 30-е годы прошлого столетия, когда в промышленности стали широко использоваться редкоземель-

Таблица 1

**Значения ПЭР при различных сценариях осушения РУ типа БРЕСТ, охлаждаемой свинцом, извлеченным из монацита, циркона, уранинита (пробы 233/4, 266/2 и 506/2 соответственно [5]), из свинцовых или полиметаллических руд и  $^{208}\text{Pb}$  (для сравнения в последней строке приведены значения ПЭР для реактора идентичной конструкции, охлаждаемой натрием)**

Минерал (руда)	Изотопный состав свинца, %				ПЭР (при разных сценариях осушения) <sup>*</sup> , β		
	$^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}$	Осушение всего реактора	Осушение АЗ и нижнего свинцового отражателя	Осушение АЗ
Монацит	0,013	0,89	0,35	97,74	–31,7520	–15,1263	11,6096
Циркон	0,226	75,58	11,54	12,48	–14,2736	0,4048	22,6550
Уранинит	0,150	85,53	10,64	3,69	–12,8460	1,6599	25,0906
Галенит	1,4	23,6	22,6	52,4	–20,5426	–4,2157	–4,2151
—	0	0	0	100	–32,4267	–15,16023	11,2648
—	$^{23}\text{Na}$				–4,3644	2,5481	19,3386

ные элементы, являющиеся побочными продуктами ториевых руд. С начала 30-х годов переработка ториевых руд велась, в основном, с целью извлечения из них редкоземельных элементов. В результате торий превратился в избыточный побочный продукт. Впоследствии запасы тория частично использовались в качестве сырья для производства  $^{233}\text{U}$  в ядерных реакторах (США, Индия). Торий нашел широкое применение в неэнергетических целях.

Избыток тория (как побочного продукта торогенного свинца) может открыть новые возможности для его использования не только в неэнергетической сфере, но и в ядерной энергетике в будущем. Во-первых, запасы тория в 4,2 раза превышают запасы урана. Во-вторых, переход на торий-урановый топливный цикл быстрых реакторов позволит немного повысить их самозащищенность. В-третьих, как известно, при переходе на торий-урановый топливный цикл немного увеличивается коэффициент воспроизводства вторичного горючего (в будущем это может быть актуальным). Конечно, выигрыш от перехода на ториевый цикл не столь велик, чтобы переориентировать всю ядерную энергетику. В концепциях реакторов нового поколения торию уделяется должное внимание.

### АНАЛИЗ ПЭР

В общем случае в задаче минимизации ПЭР за счет варьирования изотопного состава свинца целевой функционал (ПЭР) – функция четырех переменных, играющих роль управляющих параметров: концентраций четырех стабильных изотопов свинца, причем, содержание  $^{204}\text{Pb}$  мало, т.е. влиять на ПЭР изменением содержания  $^{204}\text{Pb}$  в свинце практически невозможно. В итоге в задаче минимизации ПЭР можно ограничиться рассмотрением трех управляющих параметров: содержания  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$  и  $^{208}\text{Pb}$  в свинце, причем, последнее управление оказывает наибольшее влияние на ПЭР. Очевидно, что ПЭР минимален при использовании  $^{208}\text{Pb}$  (рис. 2). Поскольку ториевые месторождения содержат уран, добыча  $^{208}\text{Pb}$  в чистом виде вряд ли возможна. В различных месторождениях концентрации стабильных изотопов свинца фиксированы, т.е. минимизация ПЭР относится к задаче дискретной оптимизации. Однако, смешивая свинец из разных месторождений в различных пропорциях, можно получить свинец с любой заданной концентрацией  $^{208}\text{Pb}$  (от 3% в урановых рудах, до 98% в ториевых рудах), не используя изотопного разделения. Данные по объемам месторождений тория в России отсутствуют, и свинца, добытого в одном месторождении,

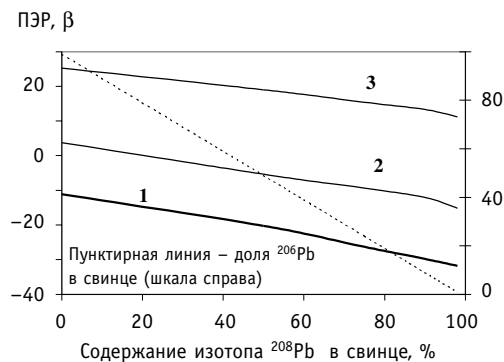


Рис. 2. Изменение ПЭР при замещении изотопа  $^{206}\text{Pb}$  изотопом  $^{208}\text{Pb}$  в свинцовом теплоносителе: предполагается, что теплоноситель состоит из  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Pb}$  и 1%  $^{207}\text{Pb}$ ; цифрами обозначены сценарии осушения: 1 – осушение всего реактора; 2 – осушение активной зоны и нижнего отражателя; 3 – осушение активной зоны

может оказаться недостаточно для удовлетворения потребностей ядерной энергетики (и даже одного реактора большой мощности со свинцовым охлаждением). Как известно, несмотря на большие собственные запасы свинца (третье место в мире), Россия импортирует свинец из-за границы. Можно, например, импортировать свинец, сопутствующий ториевым рудам с высоким содержанием тория (торианит, торит). Кроме того, следует отметить одно из преимуществ жидкометаллических теплоносителей: возможность их многократного использования в реакторах следующих поколений после извлечения (слива) из реакторов, выработавших свой ресурс и подлежащих демонтажу. При этом потери, в том числе связанные с очисткой «отработанных» теплоносителей от примесей, ничтожны [9]. В итоге затраты на приобретение теплоносителей для реакторов следующих поколений могут быть значительно снижены [9].

Анализ данных, представленных в каталоге [5] показывает, что содержание  $^{207}\text{Pb}$  в ториевых рудах с малым содержанием урана невелико и увеличение концентрации  $^{208}\text{Pb}$  в свинце происходит в основном за счет снижения концентрации  $^{206}\text{Pb}$  при малых (значит, можно считать, приблизительно постоянных) концентрациях  $^{204}\text{Pb}$  и  $^{207}\text{Pb}$ . Анализ ПЭР при различных сценариях осушения реактора БРЕСТ в зависимости от концентрации  $^{208}\text{Pb}$  в свинцовом теплоносителе при постоянных концентрациях  $^{204}\text{Pb}$  и  $^{207}\text{Pb}$  представлен на рис. 2.

При использовании в качестве теплоносителя свинца с высоким содержанием изотопа  $^{207}\text{Pb}$  баланс нейтронов наихудший, а ПЭР максимальный. Максимальное содержание  $^{207}\text{Pb}$  (22,6%) имеет свинец, извлеченный из галенитов (свинцовых и полиметаллических руд), т.е. свинец, который принято считать природным. В урановых рудах в составе свинца будет доминировать изотоп  $^{206}\text{Pb}$  (продукт распада  $^{238}\text{U}$ ). Например, минерал уранинит одного из месторождений Украинского щита содержит 51,5% урана и 16,8% свинца, изотопный состав последнего 0,15%  $^{204}\text{Pb}$  – 85,53%  $^{206}\text{Pb}$  – 10,64%  $^{207}\text{Pb}$  – 3,69%  $^{208}\text{Pb}$  [5]. При использовании теплоносителя на основе такого свинца (с высоким содержанием  $^{206}\text{Pb}$  и низким  $^{208}\text{Pb}$ ) ПЭР выше, чем в случае использования природного свинца (табл. 1). Свинец, являющийся побочным продуктом урановых руд, лучше не использовать в качестве теплоносителя быстрых реакторов.

Анализ ПЭР для реактора БРЕСТ большой мощности (активная зона бесконечного радиуса) проводился по программе MCNP [10] с целью обоснования возможности использования свинцового теплоносителя с различным изотопным составом. Предполагалось, что свинец может быть получен из разных руд и минералов: из свинцовых или полиметаллических руд (свинец с фиксированным изотопным составом),

свинец, сопутствующий ториевым месторождениям (с большим содержанием  $^{208}\text{Pb}$ ), и урановым месторождениям (уранинит) с крайне малым содержанием  $^{208}\text{Pb}$ .

Рассматривались близкие к реалистическим и гипотетические сценарии реализации ПЭР в реакторе БРЕСТ большой мощности. Все расчеты консервативны (ПЭР завышен), т.к. проведены в предположении, что утечка нейтронов через боковую поверхность отсутствует, что соответствует реактору бесконечного радиуса. На практике ПЭР, полученный в таком приближении, является точной верхней гранью ПЭР реакторов большой мощности с традиционной (цилиндрической) формой активной зоны. В качестве единственного реалистического сценария реализации ПЭР в ядерной энергетической установке БРЕСТ большой мощности при двухконтурной схеме преобразования энергии (с азотом во втором контуре) является разгерметизация трубок газонагревателя «свинец–азот» и вовлечение газовых пузырей в активную зону). Расчеты, характеризующие сценарии, близкие к реалистическим, соответствуют уменьшению плотности свинца в активной зоне до 90% от номинальной, что может реализоваться при массовой разгерметизации трубок газонагревателей [11]. При этом граница осушения (граница свинца и эмульсии свинец – газ) смещается снизу вверх (осушение «снизу вверх»). Но и здесь в большой степени присутствует гипотетичность: например, в проекте РУ БРЕСТ-ОД-300 вовлечение пузырей в активную зону исключено, в том числе за счет малой скорости свинца на опускном участке тракта циркуляции [1].

Если в реакторах типа БРЕСТ малой и средней мощности удастся обеспечить ПЭР на безопасном уровне даже при гипотетических сценариях его реализации (за счет относительно большой утечки нейтронов из активной зоны), то в реакторах больших размеров с цилиндрической формой активной зоны уменьшение плотности свинца даже на 10% может представлять опасность:  $\text{ПЭР} > \beta$  ( $\beta$  – эффективная доля запаздывающих нейтронов). Очевидно, что при увеличении доли изотопа  $^{208}\text{Pb}$  в свинце уменьшается ПЭР.

Исследовалась зависимость ПЭР от содержания изотопа  $^{208}\text{Pb}$  в теплоносителе в пренебрежении количеством  $^{204}\text{Pb}$  и при доле  $^{207}\text{Pb}$  1%. Полное осушение реактора даже при нулевой концентрации изотопа  $^{208}\text{Pb}$  в исходном теплоносителе не представляет опасности: ПЭР глубоко отрицателен. При содержании изотопа  $^{208}\text{Pb}$  в свинце более 20% можно добиться отрицательного ПЭР, что позволяет надеяться на возможность использования в качестве теплоносителя быстрого реактора даже свинца, извлеченного из урановых руд (по крайней мере из циркона). Если свинец циркона и уранинита содержит не 1% (как предполагается в расчетах), а 10–13%  $^{207}\text{Pb}$ , то ПЭР заметно ухудшается. Но даже в этом случае есть возможности использования свинца, извлеченного из циркона, поскольку при осушении активной зоны и нижнего торцевого отражателя  $\text{ПЭР} \approx 0,4 \beta$ . Значения ПЭР при различных сценариях осушения реактора типа БРЕСТ, охлаждаемого свинцом, извлеченным из разных руд, представлены в табл. 1.

Результаты показывают, что уменьшение доли  $^{208}\text{Pb}$  отчасти компенсируется увеличением доли  $^{206}\text{Pb}$ , что способствует поддержанию ПЭР на безопасном уровне. Наибольшее негативное воздействие на безопасность в ситуации, связанной с реализацией ПЭР, оказывает  $^{207}\text{Pb}$  в исходном теплоносителе, обладающий максимальным сечением неупругих процессов.

С другой стороны, для реакторов большой мощности с традиционной (цилиндрической) компоновкой активной зоны использование свинца, даже наполовину состоящего из изотопа  $^{208}\text{Pb}$ , может представлять опасность и лишь свинец ториевых руд может детерминистически исключить проблему ПЭР в таких реакторах. Это иллюстрирует рис. 3, на котором представлены реалистические значения ПЭР, связанного с



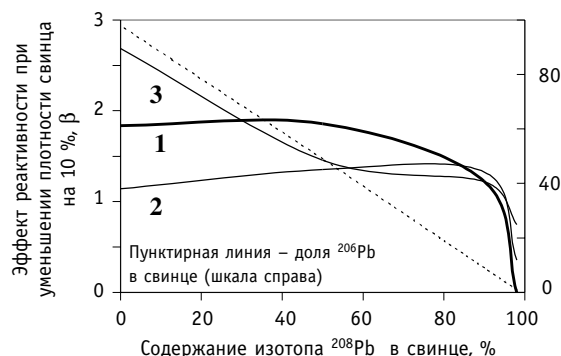


Рис. 3. Зависимость плотностного эффекта реактивности от изотопного состава свинца (предполагаются постоянными доли изотопов  $^{207}\text{Pb}$  – 1% и  $^{204}\text{Pb}$  – 0,1%): 1 – осушение всего реактора; 2 – осушение активной зоны и нижнего отражателя; 3 – осушение активной зоны



Рис. 4. Эффект реактивности при изменении плотности теплоносителя в активной зоне и нижнем отражателе: 1 – эвтектика 1,8% natK – 98,2%  $^{208}\text{Pb}$ ; 2 – природный свинец; 3 –  $^{208}\text{Pb}$

вовлечением газовых пузырей в активную зону и уменьшением плотности свинца на 10% от номинальной. Предполагается, что доля изотопов  $^{204}\text{Pb}$  и  $^{207}\text{Pb}$  в свинце постоянна (0,1 и 1% соответственно). Тогда увеличение доли  $^{208}\text{Pb}$  происходит за счет уменьшения концентрации  $^{206}\text{Pb}$ : доля изотопа  $^{208}\text{Pb}$  в свинце не превышает 98%.

Рис. 4 иллюстрирует эффекты реактивности при уменьшении плотности теплоносителя. Для сравнения представлены результаты расчетов для реактора, охлаждаемого эвтектическим сплавом 1,8% K – 98,2%  $^{208}\text{Pb}$  [7].

Итак, свинец, извлеченный из ториевых руд, наиболее предпочтителен с точки зрения реализации потенциальных возможностей быстрых реакторов (обеспечения жесткого спектра). С точки зрения самозащитности реакторов типа БРЕСТ большой мощности от аварий с реализацией ПЭР (если возможность реализации не исключить детерминистически) не обязательно использовать изотопно чистый  $^{208}\text{Pb}$ , можно ограничиться содержанием изотопа  $^{208}\text{Pb}$ , характерным для свинца ториевых месторождений и даже меньше. Это позволяет смешивать природный (1,4%  $^{204}\text{Pb}$  – 23,6%  $^{206}\text{Pb}$  – 22,6%  $^{207}\text{Pb}$  – 52,4%  $^{208}\text{Pb}$ ) и торогенный свинец.

Автор благодарит А.Н. Шмелева (МИФИ) за предоставленные материалы [5] и плодотворное обсуждение проблемы.

### Литература

1. БРЕСТ-ОД-300/Под. ред. Е.О. Адамова, В.В. Орлова. – М.: Изд-во ФГУП НИКИЭТ, 2001.
2. Физическая энциклопедия/Гл.ред. А.М. Прохоров. – М.: Большая Российская Энциклопедия, 1994. – Т.4. – С. 470-471.
3. Шмелев А.Н., Апсэ В.А., Куликов Г.Г. Физические основы обезвреживания радиоактивных отходов (трансмутация нейтронами): Учеб. пособие – М.: МИФИ, 2002.

4. Уилхелм Г.А. Торий/Кн.: Справочник по редким металлам (пер. с англ.)/Под ред. д.х.н., проф. В.Е. Плющева. – М.: Мир, 1965. – С. 786-817.
5. Каталог изотопных дат пород Украинского щита/Академия наук Украинской ССР; Институт геохимии и физики минералов; Министерство геологии УССР. – Киев: Наукова думка, 1978. – С. 90, 136.
6. Ростовский Ф.И., Хетчиков Л.Н. Рифтогенез и регенерация рудных компонентов в процессе формирования сульфидно-касситеритового оруденения Сихотэ-Алиня/Кн.: Рудные месторождения континентальных окраин. – Владивосток: Дальнаука, 2000.
7. Окунев В.С. Резервы концепции «БРЕСТ» (при переходе к энергоблокам большой мощности)/ Научная сессия «МИФИ-2006»: Сб. научн. тр. – М.: МИФИ, 2006. – Т.8. – С. 89-90.
8. Елтаренко Е.А. Оценка и выбор решений по многим критериям: Уч. пособие. – М.: МИФИ, 1995.
9. Субботин В.И., Арнольдов М.Н., Ивановский М.Н. и др. Литий. – М.: ИздАТ, 1999.
10. MCNP-4C. Monte Carlo N-Particle Transport Code System/Oak Ridge National Laboratory/Radiation Safety Information Computational Center (RSICC). RSICC Computer Code Collection. CCC-700. April 2000.
11. Иванов В.Л., Калишевский Л.Л., Козлов О.С. и др. Аналитическое и расчетное обеспечение проектных решений АЭС с реактором БРЕСТ большой мощности (БРЕСТ-2400) и газотурбинным циклом преобразования энергии/Кн. Ядерные реакторы на быстрых нейтронах: Тр. Российского науч.-технич. форума (Обнинск, 8 – 12 декабря 2003 г.).

Поступила в редакцию 4.04.2006

Different control criterions are often used for security system's reliability improvement. Nowadays this feature isn't taken into account in analysis of reactor facility's security system as a result of absence of appropriate mathematic reliability model.

In this paper shown, that taking into account mentioned above features allows to obtain more precise values of reliability index rather than in a case of assumption that different control criterions protection channels are independent.

#### **УДК 621.039.56**

*Using of Dynamic Programming Method for Optimization Trajectory Workers' Movement at Emission of Rays Threat Zone with the Purpose of Minimization Radiation Processing* \A.N. Seseikin, O.L. Tashlykov, S.E. Sheklein, M.J. Kuklin, A.G. Chentsov, A.A. Kadnikov; – Obninsk, 2006. – 8 pages, 3 illustrations, 2 tables. – References, 14 titles.

Relevance of solving of optimization's problem of trajectory workers' movement at emission of rays threat zone is substantiated.

Mathematical analysis of opportunity to use of dynamic programming method in solving of given problem was made and advantages of these method were considered.

Evaluation calculations of optimal movement's trajectory were made. shortening irradiations in different variants of in and out zone of controlled access with initial was compared.

#### **УДК 621.039.516.4**

*Some Specific Features in Neutron Physics of VVER-Type Reactors under Operation Regime of Accelerated Weapon-Grade Plutonium Denaturing* \Yu.N. Volkov, V.I. Naumov; – Obninsk, 2006. – 8 pages, 3 tables. – References, 9 titles.

The paper presents the results obtained in neutron-physical computations, which simulate main properties of VVER-type reactor cores partially loaded with weapon-grade plutonium for its accelerated denaturing. Effective fraction of delayed neutrons was used as a criterion that limits the number of plutonium fuel assemblies inserted in the reactor core. Isotopic composition of plutonium was used as a criterion that limits plutonium burn-up. The following aspects are discussed in the paper: potential ways towards increasing a throughput of VVER-type reactors on weapon-grade plutonium denaturing and neutron-physical features of VVER-type reactor cores under operation regime of accelerated weapon-grade plutonium denaturing.

#### **УДК 621.039.534.6**

*Influence of the Isotopical Composition of Coolant, Based on Lead from Thorium-Ores, on Void Reactivity Effect in BREST-type Reactor* \V.S. Okunev; – Obninsk, 2006. – 10 pages, 4 illustrations, 1 table. – References, 11 titles.

The lead cooled fast reactors are one of few concepts of the new-generation (Generation-IV) power nuclear reactors. The ideals of natural safety are attainable for the lead cooled reactors (for example, BREST). In this type power reactor is proposed to use natural lead with 1,4%  $^{204}\text{Pb}$  – 23,6%  $^{206}\text{Pb}$  – 22,6%  $^{207}\text{Pb}$  – 52,4 %  $^{208}\text{Pb}$  – isotopical composition.

The BREST-concept has potential reserves for further increase of inherent safety level. (If this to be needed.) It is weighly for the high-power reactors. Lead with high concentration of  $^{208}\text{Pb}$ -isotope utulization is one of such reserve. The isotopes dressing of lead are costly. But, it is known that  $^{208}\text{Pb}$  is product of radio-active decay of the  $^{232}\text{Th}$ . The half-live of  $^{232}\text{Th}$  is  $1,4 \cdot 10^{10}$  years. Therefore, approximately 20% of thorium was transmuted into  $^{208}\text{Pb}$ . The thorogeneous lead can be used as a coolant of the fast reactors.

Choise of the preferables deposits of lead and optimisation of the isotopical composition of lead (as the coolant of the fast reactors) are interesting for future large-scale nuclear power engineering, based on safe reactors.

#### **УДК 621.039.51**

*Investigation of the Point Model of the Xenon Oscillations* \N.O. Ryabov, A.A. Semenov; – Obninsk, 2006. – 8 pages, 6 illustrations, 1 table. – References, 6 titles.