

НЕКОТОРЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИОГЕННОГО СВИНЦА В КАЧЕСТВЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ

В.А. Апсэ, А.Н. Шмелев, А.М. Сироткин

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва



Рассматривается возможность улучшения некоторых теплофизических параметров быстрых реакторов со свинцовым теплоносителем за счет использования в них радиогенного свинца с высоким содержанием ^{208}Pb . Показано, что уникальные нейтронно-физические свойства изотопа ^{208}Pb позволяют перейти на более щадящие условия эксплуатации реактора типа БРЕСТ по скорости теплоносителя и по перепаду давления для его прокачки через активную зону при сохранении подогрева и тепловой мощности.

Ключевые слова: быстрые реакторы, теплоносители, радиогенный свинец.

Key words: fast reactors, coolants, radiogenic lead.

ВВЕДЕНИЕ

Первые опытно-демонстрационные быстрые реакторы работали на урановом оксидном топливе с натриевым теплоносителем. В будущем предполагался перевод этих реакторов на уран-плутониевое топливо. Применение натрия в качестве теплоносителя объясняется его хорошими теплофизическими свойствами. Благодаря им натрий способен отводить тепловые потоки рекордной интенсивности. В сочетании с высокими значениями коэффициента воспроизводства (КВ) это обеспечивало короткий период удвоения топлива (менее 10 лет). Однако в современных условиях, когда темп роста электроэнергетики значительно снизился, необходимость в коротких периодах удвоения топлива отпала. В то же время использование натрия, обусловленное исчезнувшими ныне условиями, привело к созданию дорогостоящих инженерных систем для сведения к минимуму эффектов, вызванных пожароопасностью натрия при его контакте с воздухом или водой. К недостаткам натрия можно еще отнести его высокую активируемость нейтронами и сравнительно низкую температуру кипения (890°C), что может привести к аварийному вскипанию и выбросу натрия из активной зоны. Как следствие, спектр нейтронов станет более жестким, и возможно возникновение положительного пустотного эффекта реактивности (ПЭР). Эти причины стимулировали разработку концепции быстрых реакторов БРЕСТ [1]. Концепция реактора БРЕСТ предполагает замену натрия на свинец – химически пассивный и слабо активируемый элемент

с высокой температурой кипения (1740°C). Кроме того, сочетание свинцового теплоносителя и более плотного нитридного топлива делает возможными следующие положительные изменения в обеспечении безопасности эксплуатации быстрых реакторов.

1. При КВ активной зоны (КВА) чуть выше единицы (например, $K_{ВА} \approx 1.04$) запас реактивности на выгорание топлива может быть снижен до уровня, не превышающего эффективную долю запаздывающих нейтронов. В результате разгон мощности на мгновенных нейтронах исключаются при любых ошибках операторов или отказах оборудования.

2. Детерминистическое исключение пожаров и крупных выбросов радиоактивных веществ в окружающую среду даже при повреждении корпуса реактора и защитной оболочки АЭС.

3. Свинец слабее замедляет нейтроны, чем натрий, поэтому аварийное удаление свинца из активной зоны в меньшей мере ужесточит нейтронный спектр, и, как следствие, изменение реактивности будет ниже, чем в случае натрия.

Однако этим преимущества свинца не исчерпываются. Дело в том, что есть природный, или «обычный» свинец, с вполне определенным изотопным составом (1.4% ^{204}Pb , 24.1% ^{206}Pb , 22.1% ^{207}Pb и 52.4% ^{208}Pb), а есть так называемый «радиогенный» свинец, образующийся в урановых, ториевых и уран-ториевых рудах. Изотопы свинца ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb являются конечными продуктами цепочек радиоактивного распада соответственно ^{238}U , ^{235}U и ^{232}Th . Поэтому изотопный состав радиогенного свинца существенным образом зависит от элементного состава руды и от возраста месторождения. Радиогенный свинец, извлеченный из ториевых или уран-ториевых руд с малой долей урановой фракции, содержит, главным образом, ^{208}Pb . В таблице 1 приведены изотопные составы радиогенного свинца, добываемого из месторождений монацита Бразилии [2], Австралии, США, Канады [3] и Украины [4].

Видно, что ^{208}Pb является основным изотопом радиогенного свинца в этих месторождениях. Радиогенный свинец с высоким содержанием ^{208}Pb представляет особый интерес по следующим причинам.

Изотоп ^{208}Pb обладает уникальными нейтронно-физическими свойствами. Ядро ^{208}Pb является дважды магическим с замкнутыми нейтронными и протонными оболочками. Уровни возбуждения ядер ^{208}Pb находятся в области более высоких энергий, чем уровни возбуждения других изотопов свинца. Поэтому ^{208}Pb слабее замедляет нейтроны при их неупругом рассеянии, а слабое замедление нейтронов при их упругом рассеянии вызвано просто большой массой ядра ^{208}Pb .

Изотоп ^{208}Pb обладает рекордно низким сечением радиационного захвата нейтронов, причем малые сечения сохраняются от тепловой точки до энергий в несколько десятков килоэлектронвольт.

Таблица 1

Изотопный состав радиогенного свинца

Страна месторождения	Доля изотопа, %			
	^{204}Pb	^{206}Pb	^{207}Pb	^{208}Pb
Бразилия	0.005	6.03	0.455	93.51
Австралия	0.038	5.44	0.972	93.55
США	0.025	9.068	1.127	89.78
Канада	0.01	10.2	1.86	87.93
Украина	0.02	6.04	0.94	93.00

Это значит, что использование радиогенного свинца с высоким содержанием ^{208}Pb в качестве теплоносителя быстрых реакторов может улучшить их нейтронно-физические характеристики. Слабое поглощение нейтронов изотопом ^{208}Pb позволит использовать уран-плутониевое топливо с меньшей долей плутониевой фракции, а слабое замедление нейтронов приведет к снижению спектральной составляющей ПЭР. В результате разработчики получают определенный ресурс в улучшении нейтронно-физических параметров реактора. Предметом настоящего исследования является попытка оценить возможности использования этого ресурса.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для проведения нейтронно-физических расчетов использовалась компьютерная программа TIME26 [5], рассматривающая одномерные модели быстрых реакторов в 26-групповом диффузионном приближении. Константное обеспечение программы TIME26 основано на библиотеке оцененных ядерных данных БНАБ-78, которая обрабатывается вспомогательной программой АРАМАКО-С1 для подготовки заблокированных микроконстант в каждой зоне реактора. Конкретно для целей настоящего исследования основной выходной информацией программы TIME26 являлись следующие параметры реактора:

- эффективный коэффициент размножения нейтронов $K_{\text{эфф}}$;
- коэффициент воспроизводства топлива в активной зоне (КВА);
- плотностной эффект реактивности (ПЛЭР), вызванный снижением плотности свинцового теплоносителя в результате его разогрева (в расчетах плотность свинца снижалась на 10%);
- вклад отдельных процессов в ПЛЭР, т.е. составляющие ПЛЭР от изменения утечки, поглощения и спектра нейтронов.

Для оценки составляющих ПЛЭР была применена точная теория возмущений, которая предполагает решение невозмущенной сопряженной задачи относительно ценности нейтронов и возмущенной прямой задачи относительно плотности потока нейтронов. Решение этих уравнений программой TIME26 позволяет определить вклады утечки, поглощения и замедления нейтронов в полное значение ПЛЭР. Используя общепринятые обозначения, формулы для расчета этих вкладов можно записать в следующем виде:

- вклад от изменения аксиальной утечки нейтронов

$$\Delta \text{ПЛЭР}(j_z) = -K'_{\text{эфф}} \cdot K_{\text{эфф}} \cdot \frac{\sum_{k,j} \delta D_{k,j} \int_{\Delta z_j} \nabla_z \phi_k^+(z) \nabla_z \phi_k'(z) dz}{\{\bar{\phi}^+ \hat{Q}' \bar{\phi}'\}};$$

- вклад от изменения поглощения нейтронов

$$\Delta \text{ПЛЭР}(\Sigma_c) = -K'_{\text{эфф}} \cdot K_{\text{эфф}} \cdot \frac{\sum_{k,j} \delta \Sigma_{c,k,j} \int_{\Delta z_j} \phi_k^+(z) \phi_k'(z) dz}{\{\bar{\phi}^+ \hat{Q}' \bar{\phi}'\}}.$$

- вклад от изменения спектра нейтронов:

$$\Delta \text{ПЛЭР}(\Sigma_d) = -K'_{\text{эфф}} \cdot K_{\text{эфф}} \cdot \frac{\sum_{k,j} \delta \Sigma_{d,k,j} \int_{\Delta z_j} \phi_k^+(z) \phi_k'(z) dz - \sum_{l=1}^{K-1} \delta \Sigma^{l \rightarrow K} \int_{\Delta z_j} \phi_k^+(z) \phi_k'(z) dz}{\{\bar{\phi}^+ \hat{Q}' \bar{\phi}'\}}.$$

Расчеты проводились для одномерной аксиальной модели центральной зоны реактора БРЕСТ-ОД-300 [6]. Основные параметры квадратной решетки твэлов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные параметры модели

Параметр	Значение
Шаг решетки твэлов, мм	13.6
Диаметр топливного сердечника, мм	7.7
Толщина контактного подслоя, мм	0.2
Толщина оболочки, мм	0.5
Диаметр твэла, мм	9.1
Топливо	(U,Pu)N; $\gamma = 14.32 \text{ г/см}^3$
Урановая фракция	Природный уран Состав: $^{235}\text{U} - 0.007$, $^{238}\text{U} - 0.993$
Плутониевая фракция	Реакторный плутоний $^{239}\text{Pu} - 0.6$, $^{240}\text{Pu} - 0.25$, $^{241}\text{Pu} - 0.11$, $^{242}\text{Pu} - 0.04$
Контактный подслои и теплоноситель	Свинец; $\gamma = 10.47 \text{ г/см}^3$
Оболочка	Нержавеющая сталь ЭП-823; $\gamma = 8 \text{ г/см}^3$ Состав: 85% Fe, 12% Cr, 3% Si
Высота топливного столба в твэле, см	110

Исходная задача заключалась в определении нейтронно-физических параметров одномерной аксиальной модели центральной зоны реактора БРЕСТ-ОД-300, охлаждаемого «обычным» свинцом. В последующих расчетах анализировались эффекты, связанные с заменой «обычного» свинца на радиогенный. Для этих расчетов результаты исходной задачи рассматривались как «эталонные», т.е. способные обеспечить проектные параметры реактора по воспроизводству топлива и безопасности эксплуатации.

Целью решения исходной задачи было определить такое содержания Pu-фракции в топливе, при котором $K_{\text{БВ}} \approx 1.04$ (близко к $K_{\text{БВ}}$ реактора БРЕСТ-ОД-300 [6]), эффективный коэффициент размножения нейтронов $K_{\text{эфф}}$, ПЛЭР от уменьшения плотности свинца на 10% и его основные составляющие. Результаты решения исходной задачи собраны в табл. 3. Видно, что ПЛЭР от снижения на 10% плотности

Таблица 3

Результаты решения исходной задачи

Параметр	Значение
Шаг решетки твэлов, мм	13.6
Доля плутониевой фракции, %	13.84
$K_{\text{БВ}}$	1.038
$K_{\text{эфф}}$	1.11
ПЛЭР(10%)	+3.33(-3)
Составляющие ПЛЭР(10%)	
$\Delta \text{ПЛЭР}(j_z)$	-5.89(-3)
$\Delta \text{ПЛЭР}(\Sigma_c)$	+1.83(-3)
$\Delta \text{ПЛЭР}(\Sigma_a)$	+7.39(-3)

«обычного» свинца в рассмотренной модели положителен. Конкуренция трех эффектов (уменьшение $K_{\text{эфф}}$ из-за большей утечки нейтронов, повышение $K_{\text{эфф}}$ из-за меньшего поглощения нейтронов и повышение $K_{\text{эфф}}$ за счет более жесткого спектра нейтронов) сложилась в пользу положительного спектрального эффекта. В дальнейших расчетах вели-

чина ПЛЭР(10%) = +3.33(–3) рассматривалась как «эталонная», т.е. приемлемая по безопасности, поскольку получена для исходной модели реактора, охлаждаемого «обычным» свинцом.

РАСЧЕТЫ МОДЕЛИ РЕАКТОРА С РАДИОГЕННЫМ СВИНЦОМ В КАЧЕСТВЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

При замене в исходной задаче «обычного» свинца на «идеальный» вариант радиогенного (100% ^{208}Pb) $K_{\text{эфф}}$ увеличился примерно на 7%, причем этот реактивный эффект примерно на 80% связан с изменением спектра нейтронов и на 20% – с меньшим поглощением нейтронов. Вклад аксиальной утечки в полный эффект реактивности оказался небольшим. Возможность получения более жесткого спектра нейтронов в быстрых реакторах при переходе на свинец с высоким содержанием ^{208}Pb уже изучалась в работах [7–10]. В них показано, что трансурановые элементы могут быть более эффективно сожжены в таком нейтронном спектре.

При замене «обычного» свинца на радиогенный с «идеальным» составом (100% ^{208}Pb) и с реальными изотопными составами задача будет состоять в том, чтобы получить варианты, эквивалентные исходному по $K_{\text{эфф}}$, КВА и ПЛЭР(10%). Результаты расчетов приведены в табл. 4.

При такой замене теплоносителя $K_{\text{эфф}}$ возрастает. Чтобы вернуть его на прежний уровень, нужно снизить долю Pu-фракции в топливе, но это повысит КВА. КВА можно вернуть к исходному значению, увеличив шаг решетки твэлов, поскольку в более просторной решетке доля Pu-фракции, необходимой для сохранения $K_{\text{эфф}}$, возрастет. Варьируя шаг решетки твэлов и долю Pu-фракции в топливе, можно найти вариант, в котором $K_{\text{эфф}}$ и КВА будут близки к исходным значениям. Но при этом может получиться совершенно иное значение реактивного эффекта ПЛЭР(10%). В качестве параметра, позволяющего добиться эквивалентности и по ПЛЭР(10%), взята высота активной зоны. Изменение высоты активной зоны способно повлиять в нужную сторону на вклад аксиальной утечки нейтронов в

Таблица 4

Влияние изотопного состава радиогенного свинца на параметры реактора

Параметр	«Обычный» свинец	100% ^{208}Pb	Радиогенный свинец				
			Бразилия	Австралия	США	Канада	Украина
$H_{\text{акт}}$, см	110	298	230	222	216	206	222
t , мм	13.6	23.6	22.2	21.7	21.2	20.4	21.7
Доля Pu-фракции, %	13.84	13.58	14.50	14.49	14.45	14.38	14.50
Сохраняемые параметры							
$K_{\text{эфф}}$	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11
КВА	1.038	1.038	1.038	1.038	1.038	1.038	1.038
ПЛЭР(10%)	+3.33(–3)	+3.36(–3)	+3.39(–3)	+3.32(–3)	+3.37(–3)	+3.34(–3)	+3.33(–3)
Составляющие ПЛЭР(10%)							
$\Delta\text{ПЛЭР}(j_z)$	–5.89(–3)	–5.11(–3)	–6.40(–3)	–6.44(–3)	–6.38(–3)	–6.31(–3)	–6.44(–3)
$\Delta\text{ПЛЭР}(\Sigma_c)$	+1.83(–3)	+1.19(–3)	+1.26(–3)	+1.26(–3)	+1.32(–3)	+1.33(–3)	+1.27(–3)
$\Delta\text{ПЛЭР}(\Sigma_d)$	+7.39(–3)	+7.28(–3)	+8.53(–3)	+8.50(–3)	+8.43(–3)	+8.32(–3)	+8.50(–3)

этот реактивный эффект. В результате можно прийти к вариантам реактора, в которых $K_{эфф}$, КВА и ПЛЭР(10%) соответствуют исходным значениям, но при других значениях доли Рн-фракции в топливе, шага решетки твэлов и высоты активной зоны. Именно эти варианты и представлены в табл. 4.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕИМУЩЕСТВА АКТИВНОЙ ЗОНЫ, ОХЛАЖДАЕМОЙ РАДИОГЕННЫМ СВИНЦОМ

Предположим, что при переходе с «обычного» свинца на радиогенный необходимо сохранить на прежнем уровне подогрев теплоносителя и тепловую мощность реактора. Этого можно достичь, изменив соответствующим образом скорость движения теплоносителя и количество твэлов в реакторе.

Подогрев теплоносителя в активной зоне может быть рассчитан следующим образом [11]:

$$\Delta T_{Т/Н} = \frac{q_{L,MAX} \cdot H_{A3}}{C_p \gamma_{Т/Н} \cdot V_{Т/Н} \cdot (t^2 - S_{ТВЭЛ}) K_Z},$$

где $q_{L,MAX}$ – максимальная линейная мощность твэлов; H_{A3} – высота активной зоны; C_p , $\gamma_{Т/Н}$ и $V_{Т/Н}$ – теплоемкость, плотность и скорость теплоносителя; t – шаг квадратной решетки твэлов; $S_{ТВЭЛ}$ – площадь твэла в элементарной ячейке; K_Z – аксиальный коэффициент неравномерности. Легко показать, что

$$K_Z = q_{L,MAX} / \bar{q} = a / \sin a,$$

где $a = 0.5\pi H_{A3} / (H_{A3} + 2\delta_Z)$; δ_Z – эффективная добавка (20 см).

При замене «обычного» свинца на радиогенный сохраняется максимальная линейная мощность твэлов, теплоемкость и плотность теплоносителя, диаметр твэла, а значит и его площадь. Следовательно, для сохранения подогрева теплоносителя на прежнем уровне его скорость должна быть изменена так:

$$\frac{V_{Т/Н}(Pb-рад)}{V_{Т/Н}(Pb)} = \frac{H_{A3}(Pb-рад)}{H_{A3}(Pb)} \cdot \frac{K_Z(Pb)}{K_Z(Pb-рад)} \cdot \frac{(t^2 - S_{ТВЭЛ})_{Pb}}{(t^2 - S_{ТВЭЛ})_{Pb-рад}}. \quad (*)$$

Здесь на изменение скорости теплоносителя влияют два противоборствующих эффекта – более просторная решетка твэлов позволяет снизить скорость свинца, а более высокая активная зона препятствует этому.

Тепловая мощность реактора определяется следующим образом:

$$W_{ЯР} = (C_p \gamma \Delta T)_{Т/Н} \cdot V_{Т/Н} \cdot (t^2 - S_{ТВЭЛ}) \cdot N_{ТВЭЛ}.$$

При замене «обычного» свинца на радиогенный сохраняется теплоемкость и плотность теплоносителя, его подогрев и площадь твэла. Для сохранения тепловой мощности реактора на прежнем уровне количество твэлов в реакторе $N_{ТВЭЛ}$ должно быть изменено так:

$$\frac{N_{ТВЭЛ}(Pb-рад)}{N_{ТВЭЛ}(Pb)} = \frac{V_{Т/Н}(Pb)}{V_{Т/Н}(Pb-рад)} \cdot \frac{(t^2 - S_{ТВЭЛ})_{Pb}}{(t^2 - S_{ТВЭЛ})_{Pb-рад}}.$$

Соотношение (*), связывающее скорости «обычного» и радиогенного свинца для достижения одинакового подогрева, позволяет перейти к следующей формуле:

$$\frac{N_{ТВЭЛ}(Pb-рад)}{N_{ТВЭЛ}(Pb)} = \frac{H_{A3}(Pb)}{H_{A3}(Pb-рад)} \cdot \frac{K_Z(Pb-рад)}{K_Z(Pb)}.$$

Еще один важный вопрос связан с влиянием более просторной решетки твэлов и более высокой активной зоны на перепад давления, требующийся для прокачки теплоносителя через активную зону. Ясно, что режим естественной циркуляции легче создать в реакторе с меньшим перепадом давления для прокачки теплоно-

сителя через активную зону. Этот перепад давления можно определить, используя следующую формулу [11]:

$$\Delta p = \xi \cdot \frac{H_{\text{ТВЭЛ}}}{d_{\text{гидр}}} \cdot \gamma_{\text{Т/Н}} \cdot \frac{V_{\text{Т/Н}}^2}{2g},$$

где ξ – коэффициент гидравлического сопротивления; $d_{\text{гидр}}$ – гидравлический диаметр ячейки твэлов; $H_{\text{ТВЭЛ}}$ – высота твэла. Коэффициент гидравлического сопротивления ξ может быть определен по известной формуле Блазиуса:

$$\xi = 0,3164 \cdot \text{Re}^{-0,25},$$

где $\text{Re} = V_{\text{Т/Н}} \cdot d_{\text{гидр}} / \nu_{\text{Т/Н}}$ – число Рейнольдса; $\nu_{\text{Т/Н}}$ – кинематическая вязкость теплоносителя.

Гидравлический диаметр ячейки твэлов можно определить так:

$$d_{\text{гидр}} = d_{\text{ТВЭЛ}} \cdot \frac{t^2 - S_{\text{ТВЭЛ}}}{S_{\text{ТВЭЛ}}}.$$

Высота твэла $H_{\text{ТВЭЛ}}$ складывается из высот активной зоны $H_{\text{АЗ}}$ и полости над ней $\Delta H_{\text{ГПД}}$, предназначенной для сбора газовых продуктов деления (ГПД). Замена «обычного» свинца на радиогенный изменит количество твэлов и мощность, снимаемую с одного твэла. В результате это повлияет на количество делений в твэле и на накопление в нем ГПД. Поэтому придется изменять $\Delta H_{\text{ГПД}}$. Конструкция твэлов для реактора БРЕСТ включает в себя полость сбора ГПД высотой $\Delta H_{\text{ГПД}} = 90$ см [12]. При переходе на радиогенный свинец высоту полости нужно изменять пропорционально $N_{\text{ТВЭЛ}}(\text{Pb})/N_{\text{ТВЭЛ}}(\text{Pb-рад})$.

При замене «обычного» свинца на радиогенный сохраняется плотность и кинематическая вязкость теплоносителя, а также диаметр и площадь твэла. Следовательно, перепад давления на прокачку теплоносителя через активную зону изменится так:

$$\frac{\Delta p(\text{Pb-рад})}{\Delta p(\text{Pb})} = \frac{H_{\text{ТВЭЛ}}(\text{Pb-рад})}{H_{\text{ТВЭЛ}}(\text{Pb})} \cdot \left[\frac{V_{\text{Т/Н}}(\text{Pb-рад})}{V_{\text{Т/Н}}(\text{Pb})} \right]^{1,75} \cdot \left[\frac{(t^2 - S_{\text{ТВЭЛ}})_{\text{Pb}}}{(t^2 - S_{\text{ТВЭЛ}})_{\text{Pb-рад}}} \right]^{1,25}.$$

Используя соотношение (*), получим

$$\frac{\Delta p(\text{Pb-рад})}{\Delta p(\text{Pb})} = \frac{H_{\text{ТВЭЛ}}(\text{Pb-рад})}{H_{\text{ТВЭЛ}}(\text{Pb})} \cdot \left[\frac{H_{\text{АЗ}}(\text{Pb-рад})}{H_{\text{АЗ}}(\text{Pb})} \right]^{1,75} \cdot \left[\frac{K_z(\text{Pb})}{K_z(\text{Pb-рад})} \right]^{1,75} \cdot \left[\frac{(t^2 - S_{\text{ТВЭЛ}})_{\text{Pb}}}{(t^2 - S_{\text{ТВЭЛ}})_{\text{Pb-рад}}} \right]^3.$$

В таблице 5 приведены теплофизические параметры центральной зоны реактора, теплоносителем в котором является радиогенный свинец из разных месторождений.

Во всех вариантах сохраняются одинаковыми температура теплоносителя на выходе из активной зоны, его подогрев и тепловая мощность зоны. В этих условиях расход теплоносителя не меняется. Поэтому доля мощности насосов, затрачиваемая на прокачку теплоносителя через активную зону, будет прямо пропорциональна перепаду давления Δp . Видно, что переход с «обычного» свинца на радиогенный позволяет снизить эту долю мощности насосов в 5–7 раз.

Вместе с тем, величины скорости прокачки теплоносителя $V_{\text{Т/Н}}$ и перепада давления Δp для его прокачки через активную зону при использовании радиогенного свинца из различных месторождений несильно отличаются от параметров реактора, охлаждаемого ^{208}Pb . Что касается количества твэлов, сохраняющего полную тепловую мощность реактора, то здесь ситуация иная. Радиогенный свинец, состоящий только из ^{208}Pb , позволяет снизить количество твэлов в 2.5 раза, а варианты с реальным радиогенным свинцом – не более чем в два раза.

Таблица 5

Теплофизические параметры при переходе на радиогенный свинец

Параметр	«Обычный» свинец	100% ^{208}Pb	Радиогенный свинец			
			Бразилия	Австралия	США	Канада
t , мм	13.6	23.6	22.2	21.7	21.2	20.4
$H_{\text{АЭ}}$, см	110	298	230	222	216	206
$N_{\text{ТВЭЛ}}$, отн.ед.	1	0.41	0.52	0.54	0.55	0.58
$R_{\text{АЭ}}$, отн.ед.	1	1.11	1.18	1.17	1.16	1.14
$\Delta H_{\text{ГПД}}$, см	90	220	173	167	164	155
$H_{\text{ТВЭЛ}}$, см	200	518	403	389	380	361
K_z	1.261	1.409	1.375	1.370	1.366	1.359
$S_{\text{Т/Н}} = t^2 - S_{\text{ТВЭЛ}}$, отн.ед.	1	4.10	3.57	3.38	3.21	2.93
$V_{\text{Т/Н}}$, отн.ед.	1	0.59	0.54	0.58	0.54	0.55
Δp , отн.ед.	1	0.18	0.14	0.15	0.16	0.19

ВОЗМОЖНОСТЬ ВОСПРОИЗВОДСТВА ТОПЛИВА В ТОРЦЕВЫХ ЭКРАНАХ РЕАКТОРА БРЕСТ

Предположим, что геометрическая модель реактора включает в себя активную зону со смешанным уран-плутониевым нитридным топливом, торцевой экран с нитридом природного урана в качестве воспроизводящего материала и слой свинца над экраном.

Исходными данными для расчетов являются приведенные выше результаты, полученные для активной зоны, охлаждаемой ^{208}Pb (третий столбец табл. 5). Как было показано ранее, этот вариант эквивалентен модели реактора БРЕСТ, охлаждаемого «обычным» свинцом по $K_{\text{эф}}$, КВА и ПЛЭР(10%). Эквивалентность достигнута за счет несколько меньшей доли Pu-фракции в топливе, существенно более высокой активной зоны и существенно более просторной решетки твэлов.

Введение торцевой зоны воспроизводства, содержащей нитрид природного урана, может заметно изменить основные параметры реактора. Поэтому задача состоит в том, чтобы, варьируя долю Pu-фракции в топливе, высоту активной зоны и шаг решетки твэлов, найти вариант реактора с торцевым экраном, эквивалентный исходному по $K_{\text{эф}}$, КВА и ПЛЭР(10%), и оценить коэффициент воспроизводства топлива в экране (КВЭ) в зависимости от его толщины. При этом стратегия поиска оптимального варианта остается той же, что и при получении результатов, представленных в табл. 4. Полный коэффициент воспроизводства топлива может увеличиться за счет вклада торцевого экрана. Вот этот выигрыш и нужно оценить для различных толщин торцевого экрана $\Delta H(\text{ТЭ})$. Результаты расчетов представлены в табл. 6.

Видно, что по мере утолщения торцевого экрана КВЭ постепенно увеличивается и выходит на насыщение в районе $\text{КВЭ} \approx 0.15$. При этом доля Pu-фракции несколько уменьшается, решетка твэлов становится более тесной и высота активной зоны снижается. Используя приведенные выше соотношения, можно оценить влияние торцевого экрана на скорость течения ^{208}Pb и количество твэлов, при которых подогрев теплоносителя и тепловая мощность реактора сохраняются на прежнем уровне. Кроме того, можно оценить влияние торцевого экрана на перепад давления, требующийся для прокачки теплоносителя через активную зону и торцевой

Таблица 6

Варианты с торцевым экраном

Параметр	Толщина торцевого экрана, см			
	10	20	40	60
Доля Pu-фракции, %	13.51	13.46	13.39	13.35
Шаг решетки твэлов, мм	22.5	21.9	21.4	21.3
Высота активной зоны, см	270	260	256	255
$K_{эфф}$	1.11	1.11	1.11	1.11
КВА	1.038	1.038	1.038	1.038
КВЭ	0.042	0.080	0.124	0.142
ПЛЭР(10%)	+3.31(–3)	+3.37(–3)	+3.32(–3)	+3.33(–3)

экран. Результаты оценок представлены в табл. 7. Предполагалось, что вклад торцевого экрана в подогрев теплоносителя и тепловую мощность реактора пренебрежимо мал.

Таблица 7

Теплофизические параметры для вариантов с торцевым экраном

Параметр	Толщина торцевого экрана, см				
	0	10	20	40	60
$V_{T/H}(^{208}\text{Pu})/V_{T/H}(\text{Pu})$	0.59	0.60	0.62	0.64	0.65
$N_{ТВЭЛ}(^{208}\text{Pu})/N_{ТВЭЛ}(\text{Pu})$	0.41	0.45	0.47	0.47	0.48
$\Delta p(^{208}\text{Pu})/\Delta p(\text{Pu})$	0.18	0.20	0.23	0.29	0.32

Видно, что появление торцевого экрана привело к некоторому ухудшению теплофизических параметров реактора по сравнению с исходным вариантом. Скорость течения ^{208}Pb , обеспечивающая тот же подогрев, что и в случае «обычного» свинца, несколько повысилась в относительных единицах (с 0.59 до 0.65). Этот эффект связан, в основном, с более тесной решеткой твэлов. Количество твэлов, обеспечивающее ту же тепловую мощность реактора, что и в случае «обычного» свинца, тоже несколько повысилось (с 0.41 до 0.48). И этот эффект также связан, в основном, с более тесной решеткой твэлов. Наибольшее изменение претерпел перепад давления, требующийся для прокачки теплоносителя через активную зону и торцевой экран (в относительных единицах перепад давления повысился примерно в два раза, с 0.18 до 0.32). Причиной этого является суммарное действие увеличения полной высоты твэлов (активная зона плюс торцевой экран и полость ГПД), а также более тесной решетки.

Таким образом, введение торцевого экрана позволило повысить полный коэффициент воспроизводства топлива (на 0.10–0.15), но ценой этого выигрыша стало некоторое ухудшение других параметров реактора. Пришлось несколько повысить скорость теплоносителя, увеличить количество твэлов и, главное, заметно повысить перепад давления на прокачку теплоносителя через активную зону и торцевой экран, что может что может ослабить отвод тепла в режиме естественной циркуляции при аварийных ситуациях.

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Использование радиогенного свинца в качестве теплоносителя реактора

БРЕСТ-ОД-300 вместо «обычного» свинца может заметно улучшить его эксплуатационные характеристики.

2. Основные преимущества радиогенного свинца связаны, в первую очередь, с меньшей способностью изотопа ^{208}Pb замедлять нейтроны и, во вторую очередь, с его меньшей способностью поглощать их.

3. Реактор, охлаждаемый радиогенным свинцом, может быть сделан эквивалентным реактору, охлаждаемому «обычным» свинцом, по $K_{\text{эфф}}$, КВА и ПЛЭР(10%) за счет некоторого изменения доли Pu-фракции в топливе, но при существенном увеличении высоты активной зоны и шага решетки ТВЭЛОВ.

4. Расчетные оценки теплофизических параметров показали, что при сохранении тепловой мощности реактора, а также температурных условий работы теплоносителя и ТВЭЛА скорость радиогенного свинца может быть понижена примерно на 40%, полное количество ТВЭЛОВ в реакторе может быть уменьшено в 2–2.5 раза, а перепад давления на прокачку теплоносителя через активную зону – в 5–7 раз.

5. Основную роль в улучшении теплофизических параметров быстрого реактора типа БРЕСТ, охлаждаемого радиогенным свинцом, играет более просторная решетка ТВЭЛОВ. Заметно меньший перепад давления, требующийся на прокачку теплоносителя через активную зону с более просторной решеткой ТВЭЛОВ, создает лучшие условия для организации режима естественной циркуляции теплоносителя в аварийной ситуации.

6. Обоснована возможность введения торцевого экрана с целью повышения полного коэффициента воспроизводства топлива до значения 1.18 при сохранении КВА на прежнем уровне.

В большинстве случаев максимальный выигрыш достигается при использовании «чистого» ^{208}Pb . Так что можно поставить задачу изотопного обогащения радиогенного свинца до 100% ^{208}Pb . Но оправдает ли себя такое обогащение свинца для снижения затрат на производство меньшего количества более длинных ТВЭЛОВ? Ответ на этот вопрос требует дополнительного изучения.

Литература

1. Орлов В.В. Эволюция технической концепции быстрого реактора. Концепция БРЕСТ/ Труды Международного семинара «Быстрый реактор и топливный цикл естественной безопасности для крупномасштабной энергетики. Топливный баланс, экономика, безопасность, отходы, нераспространение» (Москва, 2000).
2. Godoy J.M., Godoy M.L., Aronne C.C. // Journal of Brazilian Chemical Society. – 2007. – V. 18. – P. 12.
3. Nier A.O., Tompson R.W., Murphey B.F. // Physical Review. – 1941. – V. 60. – P. 112.
4. Каталог изотопных дат пород украинского щита. – Киев: Наукова думка, 1978.
5. Апсэ В.А., Шмелев А.Н. Использование программы TIME26 в курсовом проектировании быстрых реакторов и электроядерных установок: Учебно-методическое пособие. – М.: МИФИ, 2008.
6. Орлов В.В., Леонов В.Н., Сила-Новицкий А.Г. и др. Конструкция реакторов БРЕСТ. Экспериментальные работы для обоснования концепции реакторов БРЕСТ. Результаты и планы/Труды Международного семинара «Быстрый реактор и топливный цикл естественной безопасности для крупномасштабной энергетики. Топливный баланс, экономика, безопасность, отходы, нераспространение» (Москва, 2000).
7. Shmelev A.N., Kulikov G.G., Apse V.A., et al. Radiowaste Transmutation in Nuclear Reactors. – Proceedings of a Specialists Meeting «Use of Fast Reactors for Actinide Transmutation» (Obninsk, Russian Federation, September 22–24, 1992), IAEA-TECDOC-693. – P. 77–86.
8. Шмелев А.Н., Куликов Г.Г., Глебов В.Б. и др. Безопасность быстрого реактора-выжигателя долгоживущих актиноидов, извлеченных из радиоактивных отходов // Атомная энергия. – 1992. – Т. 73. – № 6. – С. 450–454.

9. Хорасанов Г.Л., Иванов А.П., Коробейников В.В. и др. Свинцовый теплоноситель для быстрого реактора-выжигателя с жестким спектром нейтронов//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1999. – № 1. – С. 80-84.

10. Хорасанов Г.Л., Блохин А.И., Синица В.В. Выжигание трансурановых элементов в жестком спектре нейтронов//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2000. – № 3. – С. 76-81.

11. Петунин Б.В. Теплоэнергетика ядерных установок. – М.: Атомиздат, 1960.

12. Борисов О.М., Орлов В.В., Наумов В.В. и др. Требования к активной зоне/Труды Международного семинара «Быстрый реактор и топливный цикл естественной безопасности для крупномасштабной энергетики. Топливный баланс, экономика, безопасность, отходы, нераспространение» (Москва, 2000).

Поступила в редакцию 15.04.2010

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039.534

Some Benefits from Use of Radiogenic Lead as a Coolant of Fast Reactors \V.A. Apse, A.N. Shmelev, A.M. Sirotkin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 11 pages, 7 tables. – References, 12 titles.

The paper evaluates a possibility to improve some thermal-physical parameters of lead-cooled fast reactors (BREST-type reactors) by using radiogenic lead with large content of isotope ^{208}Pb as a coolant. The paper demonstrates that unique neutron-physical properties of ^{208}Pb allow to use more sparing conditions for routine operation of lead-cooled fast reactors on coolant velocity and pressure drop for coolant flow through the reactor core while coolant heating up and total thermal power is kept constant.

УДК 621.039.51

Singular Approach in Physical Calculations of the Fast Reactor Plant \A.A. Bezborodov, E.V. Dolgov, D.A. Klinov, V.V. Kolesov, V.Yu. Stogov, I.R. Suslov, V.I. Folomeev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 1 table. – References, 20 titles.

The aim of the paper is considering of the application of the singular functions technique employment in practical tasks for description of neutron cross-sections interactions with media nuclides nuclei in resonance part of energy for physical simulation of the fast reactor plants, in which non-resolution field is important.

УДК 621.039.548

Peculiar Features of the MIR Reactor Core Configuration \A.L. Izhutov, V.V. Kalygin, A.P. Malkov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 6 pages, 5 illustrations. – References, 7 titles.

Presented are principles of core configuration of the MIR lope-type research reactor, which allow the required irradiation conditions of experimental fuel elements and assemblies to be provided. Preliminary testing results substantiated an increase in the number of control rods. This ensured the observance of nuclear safety requirements during reloading of the reactor taking account of personnel errors and also possibility to provide conditions in the MIR core suitable for the performance of new types of experiments. The proposed and implemented method of non-uniform loading of the core ensures saving of fuel, minimization of the reactor power during simultaneous irradiation of several experimental fuel assemblies and constancy of neutron flux profile in the experimental channels.

УДК 621.039.56

Conditions for Minimum Deviation from Zero Level of Reactivity in Point Model for Unlocked Burnable Poison \Yu.A. Kazansky, D.M. Titov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 4 illustrations. – References, 10 titles.

For the low power reactors in the implementation of the idea of self-control, it is important to obtain the time dependence of reactivity, possibly a little different from zero level. At the same time, we know that by using of burnable poison positive overshoot of reactivity is observed. In this paper we present conditions under which it is possible to realize the minimum deviation from zero reactivity during burnup

УДК 621.039.548

Arrangement of Additional High-Flux Irradiation Volumes in the SM Reactor Core \Yu.A. Krasnov, A.P. Malkov, A.L. Petelin, V.V. Pimenov, V.A. Uzikov, S.I. Chekalkin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 9 pages, 2 tables, 6 illustrations. – References, 5 titles.

To increase the effectiveness of the SM operation by arranging additional irradiation volume in the high-flux channels, it was proposed to locate two FAs with experimental channels 24.5mm in diameter in the core cells adjacent to the neutron trap. The channels should be adjacent both to the neutron trap and to each other. In this case, additional irradiation volume, so-called «small trap», can be arranged. The calculations and experiments performed to investigate the SM characteristics in the