

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НЕЙТРОННЫХ СПЕКТРОВ ВО ВНУТРЕННЕЙ ПОЛОСТИ И ВНЕШНЕМ ОТРАЖАТЕЛЕ БЫСТРОГО РЕАКТОРА, ОХЛАЖДАЕМОГО СВИНЦОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ ДЛЯ ЗАМЕДЛЕНИЯ КИНЕТИКИ И НАКОПЛЕНИЯ ЦЕЛЕВЫХ НУКЛИДОВ

Куликов Г.Г., Шмелёв А.Н., Апсэ В.А., Куликов Е.Г.
(НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия)

Введение

В ряде научных публикаций [1–4] показано, что использование радиогенного свинца с повышенным содержанием ^{208}Pb в качестве теплоносителя и нейтронного отражателя, окружающего АЗ быстрых реакторов, обеспечивает получение этими реакторами некоторых важных преимуществ. Одной из наиболее значимых выгод от такого применения радиогенного свинца вместо природного свинца является возможность существенно (на несколько порядков) удлинить среднее время жизни мгновенных нейтронов $l_{\text{мгн}}$, доведя его с уровня долей микросекунд до уровня долей миллисекунд, т. е. до уровня реакторов на тепловых нейтронах.

Столь сильное удлинение $l_{\text{мгн}}$ обусловлено уникальными свойствами ^{208}Pb . Этот изотоп является дважды магическим нуклидом с замкнутыми протонными и нейтронными оболочками. Поэтому микросечения радиационного захвата нейтронов ^{208}Pb ($\sim 0,23$ мб в тепловой точке) на два с лишним порядка меньше [5], чем у природного свинца (~ 174 мб) и у графита ($\sim 3,9$ мб). Это преимущество ^{208}Pb сохраняет в достаточно широком диапазоне энергий реакторных нейтронов, от тепловой области до нескольких десятков кэВ.

Кроме того, уровни возбуждения ядра ^{208}Pb расположены при более высоких энергиях (первый уровень – 2,61 МэВ) по сравнению с уровнями возбуждения ядер остальных изотопов свинца (0,57–0,90 МэВ) [5]. Это приводит к тому, что порог сечения неупругого рассеяния ^{208}Pb расположен выше, чем у других изотопов свинца. С другой стороны ^{208}Pb является слабым замедлителем нейтронов при их упругом рассеянии из-за большого атомного веса.

В результате слабое поглощение и замедление нейтронов изотопом ^{208}Pb приводит к тому, что нейтроны, рожденные в АЗ и ушедшие из нее в физически толстый ^{208}Pb -отражатель, могут оставаться там достаточно долго. Затем эти нейтроны имеют возможность вернуться назад и принять участие в ЦРД, но с некоторой временной задержкой. Эта временная задержка пребывания нейтронов в слабо поглощающем отражателе способна существенно удлинить среднее время жизни мгновенных нейтронов и тем самым замедлить развитие ЦРД при реактивных авариях.

Кроме того, введение в центр быстрого реактора внутренней ^{208}Pb -полости открывает возможность создания внутри АЗ своего рода области накопления резонансных, эпитепловых и тепловых нейтронов. Эти нейтроны могут оказаться способными замедлить развитие ЦРД, аналогично нейтронам, ушедшим в физически толстый внешний отражатель и вернувшимся затем в АЗ. Наличие внутри АЗ полости, содержащей достаточно много резонансных нейтронов, может благоприятно повлиять на величину стабилизирующего Доплер-эффекта при аварийном росте температуры топлива.

1. Геометрическая модель быстрого реактора со свинцовым теплоносителем

Современные проекты быстрых реакторов со свинцовым теплоносителем характеризуются сильно уплощенными АЗ [6–8]. Поэтому для изучения нейтронно-физических особенностей, определяющихся аксиальным распределением нейтронов, вполне допустимо использовать одномерную плоскую (аксиальную) модель реактора.

Для того чтобы выяснить, насколько оправдываются указанные выше предпосылки о преимуществах использования ^{208}Pb в качестве материала внутренней полости, теплоносителя и отражателя, были проведены соответствующие нейтронно-физические расчеты. В этих расчетах использовалась компьютерная программа TIME26 [9], 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 [10] для подготовки блокированных микросечений в каждой зоне реактора. Расчеты проводились для одномерной аксиальной модели быстрого реактора со свинцовым теплоносителем и смешанным нитридным уран-плутониевым топливом. Геометрические характеристики твэлов взяты из проекта реактора, описанного в работе [8]: диаметр топливной таблетки – 7,7 мм, толщина зазора между топливом и оболочкой – 0,2 мм, толщина стальной оболочки – 0,5 мм, шаг треугольной решетки твэлов – 13,6 мм, высота топливного столба – 110 см.

Аксиальная модель представляла собой следующую последовательность зон. В центре АЗ, прилегающей к оси симметрии, находится первая зона – это свинцовая полость переменной толщины. Над ней находится верхняя половина АЗ фиксированной толщины (55 см – полувысота топливного столба из-за симметрии задачи). Над АЗ размещается внешний свинцовый отражатель (толщиной 250 см), заполненный горячим свинцом, покинувшим АЗ. Рассмотрены два материала центральной полости, теплоносителя и отражателя – это либо природный свинец, либо ^{208}Pb (рис. 1).

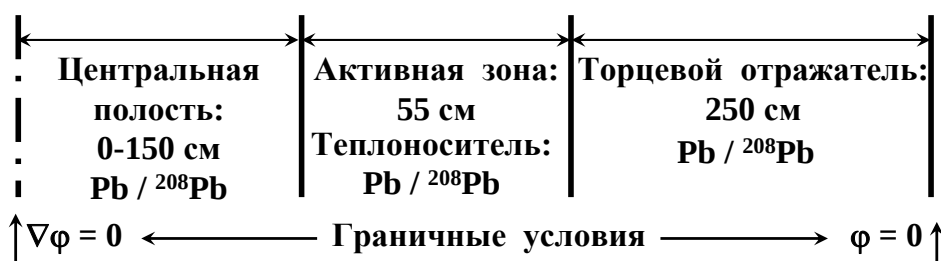


Рис. 1. Геометрическая модель быстрого реактора с центральной полостью и торцевым отражателем

При нулевой толщине центральной полости находилась доля плутониевой фракции в смешанном нитридном уран-плутониевом топливе, соответствующая критическому состоянию реактора. Затем толщина центральной полости менялась, и рассчитывались следующие нейтронно-физические параметры: эффективный коэффициент размножения нейтронов $K_{\text{эфф}}$, энергетический спектр нейтронов в центральной полости, среднее время жизни мгновенных нейтронов $l_{\text{мгн}}$ и доплеровская постоянная $K_D (T \cdot (dK_{\text{эфф}}/dT))$, где T – температура топлива).

Для более наглядного представления энергетического спектра 26-групповые потоки нейтронов сведены в три более широкие группы следующим образом: резонансные нейтроны с энергией в области резонансов ^{238}U от 4,65 эВ до 21,5 кэВ, быстрые, а также эпитепловые и тепловые нейтроны с энергией, соответственно, выше и ниже резонансов ^{238}U .

2. Результаты нейтронно-физических расчетов модели быстрого реактора

На рисунках 2 и 3 показаны спектры и абсолютная величина полной плотности потока нейтронов в центральной полости толщиной 200 см, АЗ толщиной 55 см и отражателе толщиной 250 см при использовании в них природного свинца и ^{208}Pb , соответственно. Поведение спектра нейтронов в обоих случаях примерно одинаково, особенно это касается доли быстрых нейтронов с максимумом в АЗ и спадом в центральной полости и отражателе. Напротив, доля резонансных, а также эпитепловых и тепловых нейтронов характеризуется минимумом в АЗ с подъемом в центральной полости и отражателе. Причем, подъем доли резонансных нейтронов больше в случае природного свинца, а эпитепловых и тепловых – в случае ^{208}Pb . Это объясняется тем, что быстрые нейтроны выступают в роли источника нейтронов для других групп, а также меньшим поглощением нейтронов свинцом-208 по сравнению с природным свинцом.

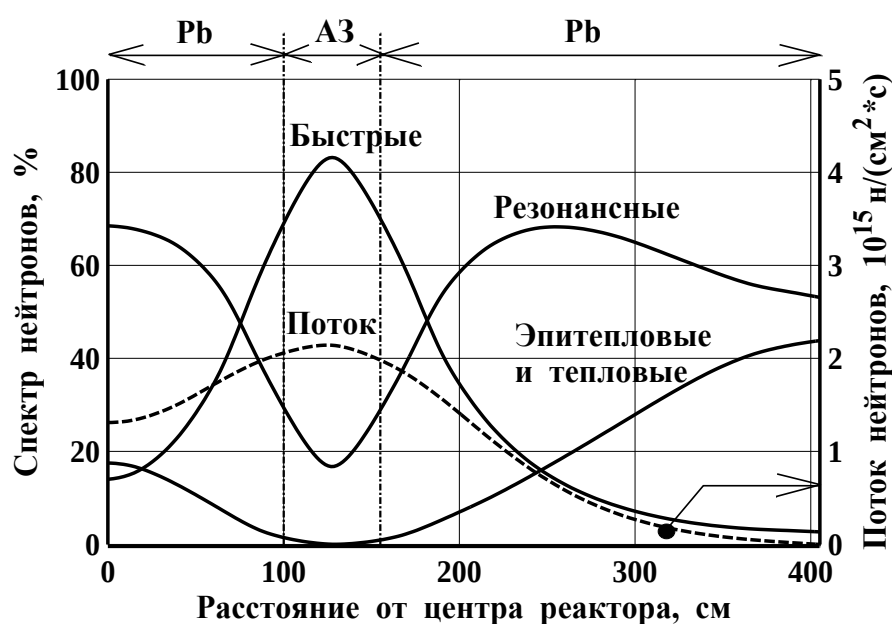


Рис. 2. Спектр и полная плотность потока нейтронов в центральной полости, активной зоне (АЗ) и отражателе с природным свинцом

Последнее приводит к тому, что величина плотности потока нейтронов в центральной полости из природного свинца существенно меньше, чем в АЗ, а в ^{208}Pb -полости существенно больше (см. рис. 3). В итоге плотность потока нейтронов в центре ^{208}Pb -полости примерно в 2,5 раза больше, чем в полости из природного свинца. Это позволит более эффективно трансмутировать долгоживущие продукты деления, причем в более мягком спектре нейтронов ^{208}Pb -полости.

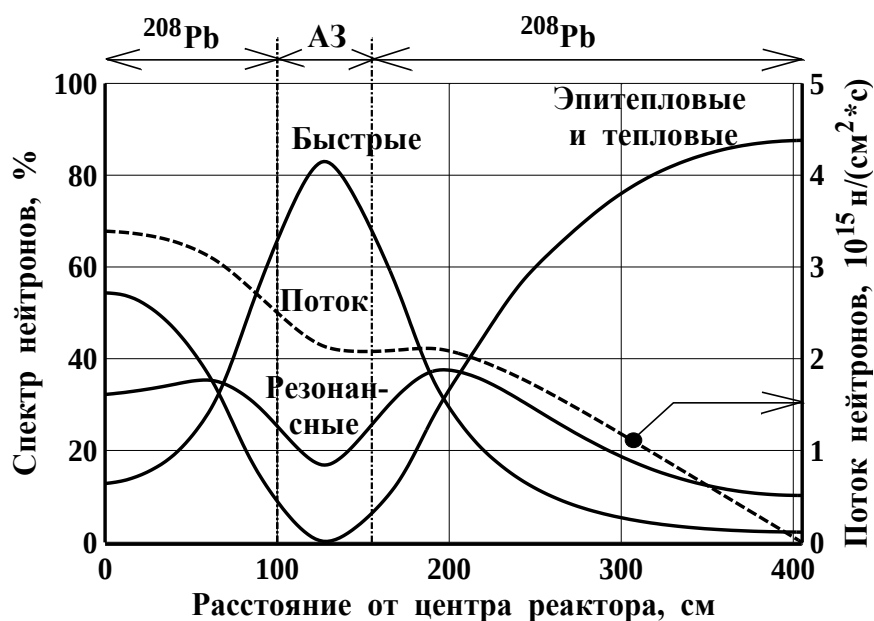


Рис. 3. Спектр и плотность потока нейтронов в центральной полости, активной зоне (АЗ) и отражателе со свинцом-208

На рисунке 4 приведены усредненные энергетические спектры нейтронов по объему центральной полости различной толщины (от 50 до 300 см), заполненной природным свинцом или ^{208}Pb .

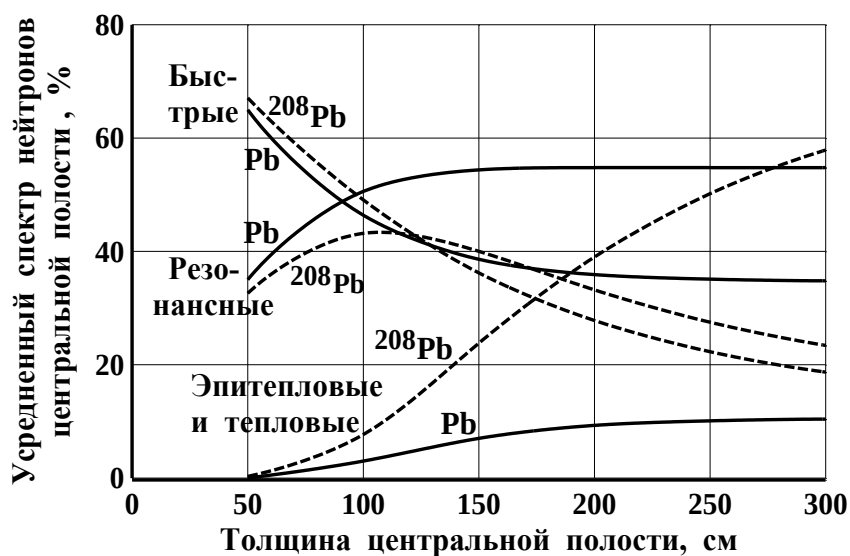


Рис. 4. Усредненный спектр нейтронов центральной полости от ее толщины

Видно, что ^{208}Pb является более эффективным преобразователем быстрых нейтронов, мигрирующих в центральную полость из АЗ, в эпитепловые и тепловые нейтроны, чем природный свинец. Действительно, при толщине центральной полости, равной 200 см, доля эпитепловых и тепловых нейтронов в ^{208}Pb -полости составляет 0,39, а в полости из природного свинца – лишь 0,09 (примерно в четыре раза меньше). Если же толщина центральной полости увеличена до 300 см, то эти же доли составляют 0,58 у ^{208}Pb и только 0,10 у природного свинца (почти в шесть раз меньше).

Столь большая доля эпитепловых и тепловых нейтронов в центральной ^{208}Pb -полости создает предпосылки для удлинения среднего времени жизни

мгновенных нейтронов и для усиления Доплер-эффекта при аварийном повышении температуры топлива. Результаты соответствующих расчетов приведены на рис. 5 и 6.

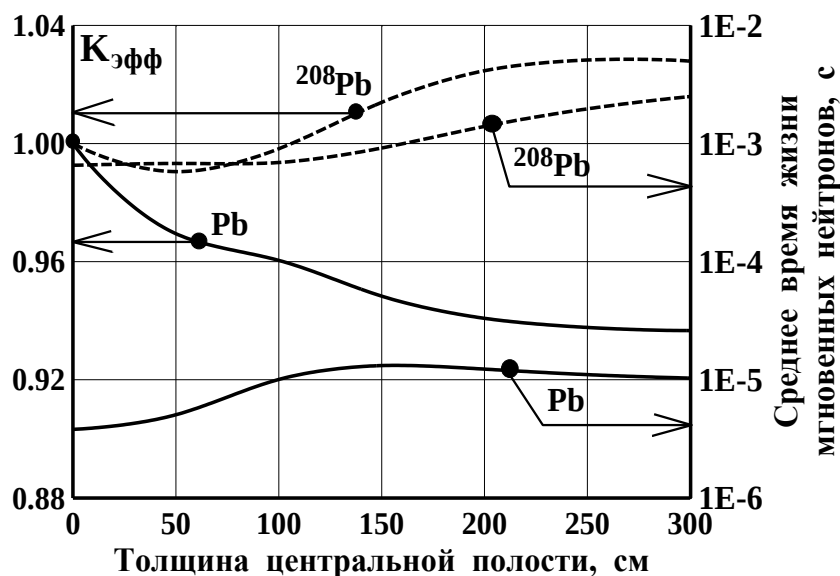


Рис. 5. Критичность и среднее время жизни мгновенных нейтронов в зависимости от толщины центральной полости

Из рисунков можно сделать следующие выводы. При утолщении внутренней полости из природного свинца эффективный коэффициент размножения нейтронов $K_{\text{эфф}}$ монотонно уменьшается, среднее время жизни мгновенных нейтронов находится на уровне ~ 10 микросекунд, а доплеровская постоянная отрицательна и составляет примерно $-0,010$.

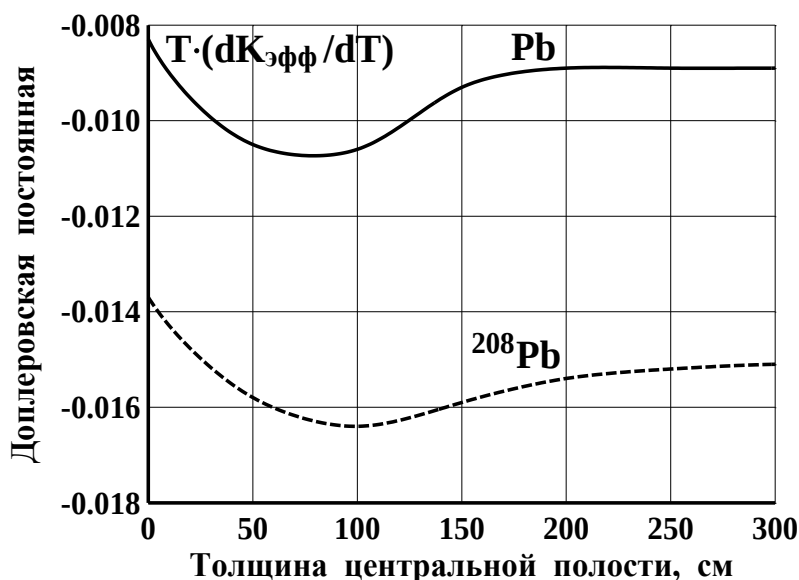


Рис. 6. Доплеровская постоянная в зависимости от толщины центральной полости из природного свинца и ^{208}Pb

Если же утолщается внутренняя ^{208}Pb -полость, то $K_{\text{эфф}}$ сначала уменьшается, проходит минимум и растет, превышая критическое значение. Среднее время жизни мгновенных нейтронов монотонно повышается. При толщине 300 см оно достигает $\sim 2,5$ миллисекунд, и это еще не предел. Доплеровская постоянная отрицательна

и составляет примерно $-0,016$, т. е. в полтора раза больше (по абсолютной величине), чем у природного свинца.

Все эти отличия являются следствием того, что ^{208}Pb по сравнению с природным свинцом существенно меньше поглощает нейтроны и более эффективно превращает быстрые нейтроны деления в резонансные, эпитепловые и тепловые нейтроны. Эти нейтроны, находящиеся в столь слабом поглотителе как ^{208}Pb , характеризуются удлинённым временем жизни. К тому же они, мигрируя обратно в АЗ, могут активизировать ЦРД и, тем самым, повысить реактивность системы. В случае аварийного разогрева топлива поглощение нейтронов резонансных энергий становится более интенсивным и Доплер-эффект усиливается.

Заключение

Представленные результаты приводят к следующим выводам.

1. Введение внутренней свинцовой полости в центр АЗ позволяет создать область, которая будет содержать в основном резонансные, эпитепловые и тепловые нейтроны. Эффект образования такого нейтронного спектра в центральной полости наиболее явно проявляется в случае ^{208}Pb -полости.

2. Резонансные, эпитепловые и тепловые нейтроны, накапливающиеся во внутренней ^{208}Pb -полости, вносят значительный вклад в удлинение среднего времени жизни мгновенных нейтронов $l_{\text{мгн}}$, дополняя аналогичный эффект от внешнего ^{208}Pb -отражателя. Замена природного свинца на ^{208}Pb во внешнем отражателе переводит $l_{\text{мгн}}$ из микросекундного диапазона в миллисекундный (с 3,8 мкс до 0,65 мс). Дополнительное создание внутренней ^{208}Pb -полости повышает $l_{\text{мгн}}$ еще в четыре раза (примерно до 2,5 мс). Удлинение времени жизни мгновенных нейтронов создает более благоприятные условия для преодоления аварий с быстрым разгоном мощности реактора.

3. Резонансные, эпитепловые и тепловые нейтроны, накапливающиеся во внутренней ^{208}Pb -полости и мигрирующие затем в АЗ, способны активизировать ЦРД и увеличить реактивность реактора.

4. В случае аварийного повышения температуры реактора эти же нейтроны, мигрируя из внутренней ^{208}Pb -полости в АЗ, усиливают стабилизирующий Доплер-эффект. Доплеровская постоянная повышается (по абсолютной величине) примерно в 1,5 раза по сравнению с вариантом использования природного свинца.

5. Высокая плотность потока смягченных нейтронов в значительных объемах центральной ^{208}Pb -полости позволяет рассчитывать на эффективную трансмутацию долгоживущих продуктов деления и наличие места для их размещения.

Список литературы

1. Апсэ В.А., Шмелев А.Н., Сироткин А.М. О возможности улучшения нейтронно-физических и тепло-гидравлических параметров энергетических быстрых реакторов при использовании радиогенного свинца в качестве теплоносителя // Ядерная физика и инжиниринг. 2010. No. 2. С. 184–195.
2. Куликов Г.Г., Шмелев А.Н., Апсэ В.А. и др. О возможности использования радиогенного свинца в ядерной энергетике // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2010. No. 3. С. 39–47.
3. Shmelev A.N., Kulikov G.G., Kryuchkov E.F., Apse V.A., Kulikov E.G. Application of Radiogenic Lead with Dominant Content of ^{208}Pb for Long Prompt Neutron Lifetime in Fast Reactor // Nuclear Technology. 2013. V. 183. No. 3. P. 409–426.

4. Куликов Г.Г., Шмелев А.Н., Куликов Е.Г. и др. Роль нейтронов отражателя в повышении сопротивляемости цепной реакции деления быстрому разгону // Атомная энергия. 2017. Т. 123. No. 6. С. 351–352.
5. Shibata K., et al. JENDL-4.0: a new library for nuclear science and engineering // Nuclear Science and Technology. 2011. V. 48. No. 1.
6. Эволюция технической концепции быстрого реактора. Концепция БРЕСТ / Орлов В.В. // Международный семинар «Быстрый реактор и топливный цикл естественной безопасности для крупномасштабной энергетики. Топливный баланс, экономика, безопасность, отходы, нераспространение» 2000. Москва. Россия. Доклад № 3.
7. Конструкция реактора БРЕСТ. Экспериментальные работы для обоснования концепции реактора БРЕСТ. Результаты и планы / Орлов В.В., Леонов В.Н., Сила-Новицкий А.Г. и др. // Международный семинар «Быстрый реактор и топливный цикл естественной безопасности для крупномасштабной энергетики. Топливный баланс, экономика, безопасность, отходы, нераспространение». 2000. Москва. Россия. Доклад № 13.
8. Требования к активной зоне / Борисов О.М., Орлов В.В., Наумов В.В. и др. // Международный семинар «Быстрый реактор и топливный цикл естественной безопасности для крупномасштабной энергетики. Топливный баланс, экономика, безопасность, отходы, нераспространение». 2000. Москва. Россия. Доклад № 15.
9. Использование программы TIME26 в курсовом проектировании быстрых реакторов и электроядерных установок. Апсэ В.А., Шмелев А.Н. Учебно-методическое пособие. 2008. Москва. НИЯУ МИФИ.
10. Комплекс программ автоматизированного расчета макроскопических констант (ARAMAKO). Николаев М.Н., Абагян Л.П., Цибуля А.М. и др. 1972. Обнинск. ФЭИ.