

БЕЗОПАСНОСТЬ БЫСТРОГО РЕАКТОРА С ОТРАЖАТЕЛЕМ, СОДЕРЖАЩИМ ЗАМЕДЛИТЕЛЬ С БОЛЬШИМ АТОМНЫМ ВЕСОМ И МАЛЫМ ПОГЛОЩЕНИЕМ НЕЙТРОНОВ

Г.Г. Куликов, А.Н. Шмелёв, В.А. Апсэ, Е.Г. Куликов

НИЯУ МИФИ

115409, Москва, Каширское шоссе, 31



Цель исследования состоит в обосновании возможности повышения безопасности быстрых реакторов путем окружения их активных зон отражателем из материала со специальными нейтронно-физическими свойствами. Такие нейтронно-ядерные свойства изотопа свинца ^{208}Pb , как большой атомный вес, малое сечение поглощения и высокий порог неупругого рассеяния, приводят к ряду особенностей кинетики быстрого реактора с отражателем из ^{208}Pb , которые могут существенным образом повысить ядерную безопасность реактора.

Отражатель позволит генерировать дополнительные запаздывающие нейтроны, которые характеризуются «мертвым» временем. Это повысит устойчивость цепной реакции деления к скачкообразному росту энерговыделения, исключит мгновенную надкритичность. Отметим, что дополнительные запаздывающие нейтроны могут быть сформированы разработчиками реактора.

Актуальность работы состоит в том, что генерация дополнительных запаздывающих нейтронов отражателя позволит ослабить последствия реактивной аварии даже в случае введения реактивности, превышающей эффективную долю запаздывающих нейтронов. При этом роль доли запаздывающих нейтронов как предельно допустимой реактивности для безопасности реакторов обесценивается.

Научная новизна работы заключается в том, что до сих пор задача о формировании дополнительных нейтронов, которые по их свойствам близки к традиционным запаздывающим нейтронам, не ставилась. Предложен новый способ повышения безопасности быстрого реактора на основе пополнения доли запаздывающих нейтронов за счет временной задержки мгновенных нейтронов при их переносе в отражателе реактора.

Для реализации рассмотренных преимуществ допустимой является комбинация, когда отражатель состоит из свинца, обогащенного по изотопу ^{208}Pb , а теплоноситель – из обычного свинца или другого вещества (натрий и т.д.).

Ключевые слова: ядерная безопасность, реактивные аварии, запаздывающие нейтроны, быстрый реактор, радиогенный свинец.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно [1], кинетика ядерных реакторов является сравнительно медленной при введении положительной реактивности меньше эффективной доли запаздывающих нейтронов, поскольку определяется их средним временем жизни (0.3 – 80 с). В случае же введения реактивности больше доли запаздывающих нейтронов кинетика становится быстропротекающей, так как она определяется существенно более коротким средним временем жизни мгновенных нейтронов: ~ 0.1 – 1 мкс для быстрых реакторов и ~ 0.1 – 1 мс для тепловых реакторов.

Именно использование легких по атомному весу замедлителей, таких как, например, вода и графит, позволяет увеличить среднее время жизни нейтронов в тепловом реакторе на три – четыре порядка по сравнению с быстрыми реакторами и соответствующим образом замедлить развитие цепной реакции деления на мгновенных нейтронах.

Цель работы – замедлить кинетику быстрого реактора и тем самым улучшить его безопасность. Этого можно добиться путем замедления нейтронов и их долгой по времени диффузии. При этом необходимо сохранить жесткий спектр нейтронов в активной зоне быстрого реактора, поэтому применение легких замедлителей невозможно. Это противоречивая и трудная задача. Она решается, если доля замедленных нейтронов будет мала, но время их жизни велико. Первое условие позволит сохранить жесткий спектр, а второе условие – увеличить среднее время жизни нейтронов. Эту возможность открывают тяжелые по атомному весу замедлители с малым поглощением нейтронов.

В быстром реакторе возможно использование отражателя нейтронов из природного свинца. У природного свинца в жесткой области энергий – интенсивное неупругое рассеяние нейтронов, а в мягкой области – значительное поглощение, поэтому нейтроны активно замедляются, а будучи замедленными уже не могут вернуться в активную зону, так как поглощаются свинцом.

Как известно, у изотопа ^{208}Pb высокий порог неупругого рассеяния, поэтому в жесткой области энергий он слабо замедляет нейтроны, а в мягкой области сечение поглощения мало [2 – 5]. Если вместо природного свинца использовать радиогенный свинец с преимущественным содержанием ^{208}Pb или свинец, обогащенный по изотопу ^{208}Pb , то возможно применение физически толстого отражателя, который будет представлять замедлитель нейтронов с большим атомным весом, а также отражатель с улучшенными отражательными свойствами. Это позволяет вернуть часть нейтронов утечки в активную зону с задержкой по времени, т.е. сформировать в быстром реакторе дополнительные запаздывающие нейтроны, которые можно назвать запаздывающими нейтронами отражателя (или отражательными запаздывающими нейтронами) в отличие от традиционных осколочных запаздывающих нейтронов, обусловленных распадом ядер-эмиттеров. Это благоприятно повлияет на кинетику быстрого реактора и повысит его безопасность [6, 7].

Следует отметить, что исследования по замедлению и переносу импульсов нейтронов в физически толстых средах, содержащих замедлитель с большим атомным весом, были тщательно изучены в 40 – 50 годы прошлого столетия [8, 9].

НЕЙТРОННО-ЯДЕРНЫЕ СВОЙСТВА СВИНЦА

Свинец характеризуется сравнительно большим атомным весом, поэтому средняя логарифмическая потеря энергии у нейтрона при упругом рассеянии на свинце мала (около 1% [10]). К тому же известно, что нейтроны высокой энергии (более 1 МэВ) после упругого рассеяния на тяжелых ядрах преимущественно сохраняют свое первоначальное направление движения [11]. Оба эти фактора приводят к тому, что высокоэнергетичные нейтроны утечки из активной зоны имеют возможность проникнуть глубоко в свинцовый отражатель. Благодаря высокому первому уровню возбуждения ядра у изо-

топа ^{208}Pb высокий порог неупругого рассеяния нейтронов (2,6 МэВ [11]) по сравнению с другими изотопами (0,6 – 0,9 МэВ [11]), т.е. ^{208}Pb меньше замедляет нейтроны мегаэлектронвольтовой области энергии, поэтому они глубже проникают в отражатель.

Ядро ^{208}Pb является дважды магическим, т.е. его нейтронные и протонные оболочки замкнуты. Видимо, поэтому ^{208}Pb по сравнению с другими изотопами свинца характеризуется чрезвычайно малым сечением захвата нейтронов [10], причем с резонансами, расположенными только при высоких энергиях. Это приводит к тому, что, во-первых, в отражателе из ^{208}Pb вероятность нейтронам замедлиться без поглощения до тепловых энергий велика (почти 100% [6, 7]) по сравнению с природным свинцом (лишь около 30% [6, 7]). Во-вторых, среднеквадратичное смещение тепловых нейтронов при их диффузии в ^{208}Pb (около 8 м [6, 7]) значительно больше, чем в природном свинце (около 0,3 м [10]). Отметим, что среднеквадратичное смещение замедляющихся нейтронов от спектра деления до тепловой энергии в свинце слабо зависит от его изотопного состава и составляет около 2 м [12]. Это означает, что после замедления в результате диффузии тепловые нейтроны имеют возможность вернуться в активную зону из глубины ^{208}Pb -отражателя, а вот отражателем из природного свинца практически все эти нейтроны будут поглощены. В-третьих, среднее время жизни тепловых нейтронов в природном свинце составляет всего около 1 мс [12], а в ^{208}Pb огромную величину – около 0,6 с [6, 7]. Время замедления нейтронов от спектра деления до тепловых энергий мало и составляет всего несколько миллисекунд даже в самых тяжелых по атомному весу средах [6, 7, 10, 12, 13]. В результате, отражатель на основе ^{208}Pb (в отличие от природного свинца) позволяет вернуть в активную зону часть нейтронов утечки, которые внесут свой вклад в цепную реакцию деления с большой задержкой по времени. Это замедлит кинетику и благотворно скажется на ядерной безопасности быстрого реактора. Для других жидкометаллических отражателей, таких как натрий и висмут [13 – 15], рассмотренные выше характеристики близки к природному свинцу, явно уступая ^{208}Pb .

Эти нейтронно-ядерные характеристики ^{208}Pb обуславливают проявление новых особенностей цепной реакции деления в кинетике быстрого реактора.

ОСОБЕННОСТИ ЦЕПНОЙ РЕАКЦИИ ДЕЛЕНИЯ, ВАЖНЫЕ ДЛЯ КИНЕТИКИ БЫСТРОГО РЕАКТОРА

В рамках сферической геометрии рассмотрен быстрый реактор небольшой мощности со свинцовым теплоносителем (300 МВт) с набором и составом подзон активной зоны, характерным для этого типа реактора. Расчеты выполнены в рамках 26-группового диффузионного приближения с помощью программы TIME26 [16]. В качестве константного обеспечения использовались библиотека ядерных данных БНАБ-78 и программный комплекс подготовки сечений АРАМАКО-С1.

Рассмотрим особенности цепной реакции деления быстрого реактора, активная зона которого окружена отражателем с большим атомным весом и слабым поглощением нейтронов.

Дополнительные запаздывающие нейтроны

В глубине отражателя формируется спектр замедленных нейтронов, которые диффундируя к активной зоне, служат дополнительными запаздывающими нейтронами для цепной реакции деления. Отражатель конвертирует мгновенные нейтроны утечки в нейтроны, которые по своим характеристикам близки к осколочным запаздывающим нейтронам. При этом фактически возрастает суммарная доля запаздывающих нейтронов.

На рисунке 1 показан вклад нейтронов с различным временем жизни в критичность быстрого и тепловых реакторов.

Если активную зону быстрого реактора со свинцовым теплоносителем окружить отражателем из природного свинца толщиной 0,5 м, то отражатель вернет в актив-

ную зону нейтроны утечки со значительным вкладом в реактивность реактора ($\sim 21 \cdot \beta$, где β – эффективная доля запаздывающих нейтронов). Однако время их жизни мало (~ 1 мкс) и слабо отличается от времени жизни нейтронов, не покидавших активную зону ($\sim 0,4$ мкс). Увеличение толщины отражателя на 1,5 м вернет в активную зону нейтроны с вкладом $\sim 4 \cdot \beta$ и временем жизни до 0,5 мс, что соответствует времени жизни мгновенных нейтронов в реакторе типа CANDU, т.е. по-прежнему мало. Это объясняется значительным сечением поглощения природного свинца. В результате нейтроны с долгим временем жизни не могут вернуться в активную зону из больших глубин отражателя и поглощаются природным свинцом во время их диффузии. К сожалению, это не позволяет в существенной степени замедлить развитие цепной реакции деления.

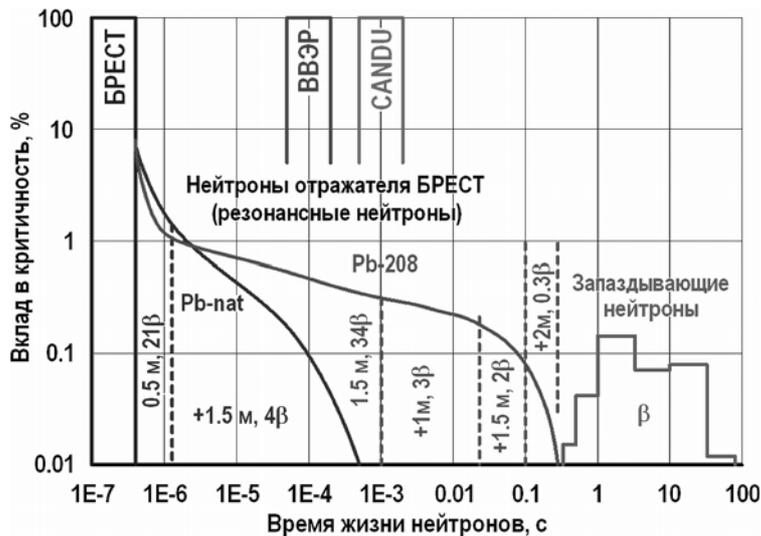


Рис. 1. Вклад нейтронов с различным временем жизни в критичность быстрого и тепловых реакторов

То же самое можно сказать и об отражателе из ^{208}Pb толщиной до $\sim 1,5$ м, который хотя и возвращает в активную зону нейтроны с большим суммарным вкладом ($\sim 34 \cdot \beta$), однако максимальное время их жизни не превышает 1 мс, т.е. как у реактора CANDU. Зато добавление еще одного метра отражателя возвращает в активную зону нейтроны со временем жизни до 0,03 с и вкладом $\sim 3 \cdot \beta$. Время жизни этих нейтронов уже существенно больше, чем среднее время жизни нейтронов в CANDU (~ 1 мс), и оно уже приближается к самой короткоживущей группе осколочных запаздывающих нейтронов (0,3 с), а вклад этих нейтронов в цепную реакцию деления примерно в 70 раз больше самой короткоживущей группы. Такие нейтроны уже способны замедлить развитие цепной реакции деления. Добавление еще 1,5 м отражателя вернет в активную зону нейтроны со временем жизни до 0,1 с и вкладом $\sim 2 \cdot \beta$. Добавление же еще 2 м отражателя возвращает нейтроны, которые по времени жизни прилегают вплотную к осколочным запаздывающим нейтронам (0,3 с). К сожалению, их вклад уже мал ($\sim 0,3 \cdot \beta$), а такие толщины отражателя представляются мало реалистичными.

Таким образом, нейтроны отражателя быстрого реактора из свинца-208 заполняют спектр временных задержек между мгновенными нейтронами и осколочными запаздывающими нейтронами по времени их жизни в диапазоне от долей микросекунд до долей секунд. При этом вклад в цепную реакцию деления самых долгоживущих нейтронов отражателя сопоставим и даже больше осколочных запаздывающих нейтронов, а их время жизни на несколько порядков больше среднего времени жизни нейтронов в тепловом реакторе. Это позволяет замедлить развитие цепной реакции деления и тем самым улучшить безопасность быстрого реактора.

«Мертвое» время дополнительных запаздывающих нейтронов

Известно, что осколочные запаздывающие нейтроны, как и мгновенные нейтроны, не побывавшие в отражателе, начинают вносить свой вклад в цепную реакцию деления сразу после акта деления, хотя их вклад и растянут по времени. В отличие от них у нейтронов отражателя всегда есть «мертвое» время, в течение которого они в принципе не могут внести свой вклад в цепную реакцию деления. Это «мертвое» время образуется как сумма времени диффузии от активной зоны к отражателю и обратно. Эта особенность нейтронов отражателя благоприятна для безопасности быстрого реактора.

Устойчивость цепной реакции деления к скачкообразному росту энерговыделения

В таком быстром реакторе цепная реакция деления характеризуется устойчивостью к скачкообразному росту энерговыделения. Благодаря возросшей доле запаздывающих нейтронов даже при введении реактивности, превышающей долю осколочных запаздывающих нейтронов (но меньше суммарной доли осколочных и отражательных запаздывающих нейтронов), цепная реакция деления будет разгоняться не на мгновенных нейтронах, не покидавших активную зону, с чрезвычайно коротким временем жизни, а на запаздывающих нейтронах отражателя, среднее время жизни которых на несколько порядков больше. Поэтому разгон будет происходить без скачкообразного роста энерговыделения и замедленно во времени.

На рисунке 2 показано изменение относительной скорости роста мощности при асимптотическом разгоне реактора в зависимости от введенной реактивности. Рассмотрены быстрый реактор со свинцовым теплоносителем с отражателями из природного свинца толщиной 0,5 м и из ^{208}Pb толщиной 4 м, а также реактор типа CANDU.

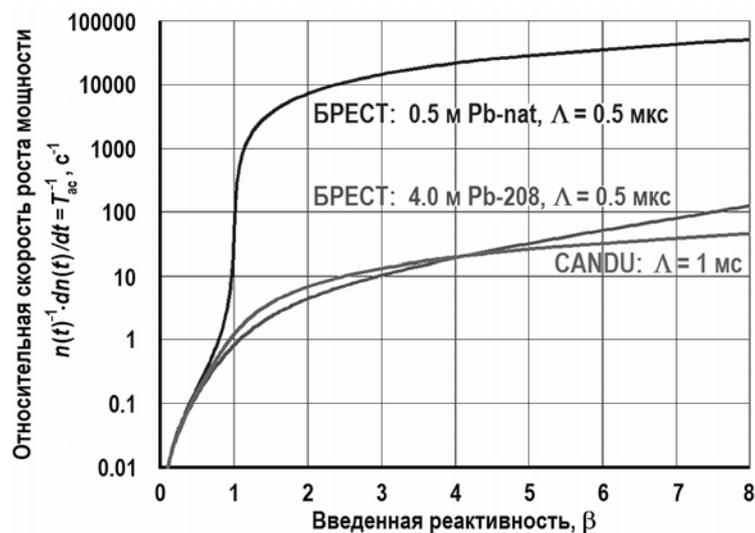


Рис. 2. Относительная скорость роста мощности в зависимости от введенной реактивности для быстрых реакторов со свинцовым теплоносителем с различными отражателями и CANDU

Видно, что быстрый реактор со свинцовым теплоносителем с отражателем из природного свинца характеризуется скачкообразным увеличением относительной скорости роста мощности (или скачкообразным уменьшением асимптотического периода разгона) при введении реактивности около доли осколочных запаздывающих нейтронов. Так при увеличении реактивности с $0,8 \cdot \beta$ до $1,2 \cdot \beta$ происходит ускорение цепной реакции деления примерно на три порядка. При этом цепная реакция деления в том же быстром реакторе, но с отражателем из ^{208}Pb , а также в реакторе типа CANDU ускоряется лишь в несколько раз. Причем ускорение у такого быстрого реактора даже меньше, чем у CANDU, который, наряду с реактором типа РБМК, характеризуется наиболее медлен-

ным развитием цепной реакции деления, так как обладает наибольшим средним временем жизни нейтронов (~1 мс).

Формирование дополнительных запаздывающих нейтронов

Запаздывающие нейтроны отражателя формируются вне активной зоны, значит, есть возможность формировать как спектр времени жизни, так и доли запаздывающих нейтронов отражателя, используя различные однослойные, а также многослойные отражатели. Времена жизни и доли запаздывающих нейтронов у топливных нуклидов практически фиксированы и влиять на них невозможно.

Повышение величины доплер-эффекта в активной зоне

Возможно целенаправленное формирование нейтронов резонансных энергий, возвращающихся из отражателя в активную зону. Это позволит повысить величину доплер-эффекта, что улучшит безопасность быстрого реактора.

Отсутствие мгновенной надкритичности

Органы регулирования, размещенные в отражателе, будут воздействовать на развитие цепной реакции деления только через запаздывающие нейтроны отражателя. При этом критичность на мгновенных нейтронах активной зоны не изменится. Это связано с наличием двух видов принципиально разных по происхождению запаздывающих нейтронов – осколочных и отражательных. Поэтому вес органов регулирования, расположенных в отражателе, будет меньше полной доли запаздывающих нейтронов на величину эффективной доли осколочных запаздывающих нейтронов. Это означает, что, если все органы регулирования будут расположены только в отражателе, то такой реактор в принципе не будет разгоняться на мгновенных нейтронах, что, естественно, повысит его безопасность.

Кинетика с переменными характеристиками запаздывающих нейтронов

Если органы регулирования разместить в отражателе, то реактор имеет цепную реакцию деления, кинетика которой характеризуется переменной долей запаздывающих нейтронов и переменной времени их жизни. Подобной особенностью обладают жидкосолевой и газофазный реакторы [17], у которых функции топлива и теплоносителя совмещены, поэтому часть топлива в жидком или газообразном виде выносится для передачи тепла из активной зоны в теплообменник. Важное отличие состоит в том, что в этих реакторах есть только осколочные запаздывающие нейтроны, поэтому их доля в активной зоне понижена. В рассматриваемом же быстром реакторе доля запаздывающих нейтронов повышена и состоит не только из осколочных, но и из отражательных запаздывающих нейтронов.

Потенциал нейтронов утечки

Природный свинец характеризуется сочетанием внутренне противоречивых параметров. Большой атомный вес приводит к медленному замедлению нейтронов, а значит, к глубокому их проникновению в отражатель. Однако значительное сечение поглощения замедленных нейтронов не позволяет им вернуться в активную зону.

Таким образом, на периферии отражателя из природного свинца формируется значимое по величине поле нейтронов, не способных вернуться в активную зону и внести вклад в цепную реакцию деления. Оценки показывают, что утечка нейтронов с внешней поверхности отражателя из природного свинца толщиной 0,5 и 1 м составляет более $30\cdot\beta$ и $20\cdot\beta$ соответственно. Безусловно, столь значительный нейтронный потенциал безвозвратно утекающих нейтронов необходимо использовать. Для этого, например, за отражателем можно поместить сырьевые нуклиды для разработки делящегося материала или радиоактивные отходы (младшие актиниды и продукты деления) для их трансмутации.

Связанная система двух зон

Оценено, что утечка с внешней поверхности отражателя из ^{208}Pb даже толщиной 2 и 4 м составляет более 22 и $15\cdot\beta$ соответственно, т.е. значительна. Значит, если за таким отражателем поместить размножающую кольцевую зону, то она способна существенно размножить нейтроны утечки и часть из них смогут вернуться в активную зону, увеличивая долю запаздывающих нейтронов. Таким образом, образуется связанная система [18 – 21], состоящая из быстрой активной зоны и размножающей кольцевой зоны со смягченным спектром нейтронов. Именно нейтроны утечки обеспечат связанность такой системы. Причем, активная зона без нейтронов размножающей кольцевой зоны будет подкритической, а скорость развития цепной реакции деления в активной зоне будет определяться длительным временем жизни нейтронов размножающей кольцевой зоны. Это также, естественно, повысит безопасность рассматриваемого быстрого реактора.

Доплер-эффект в размножающей кольцевой зоне

Если за отражателем из ^{208}Pb расположить размножающую кольцевую зону с низкой теплопроводностью и создать в зоне резонансный спектр нейтронов, то в случае нейтронной вспышки в активной зоне размножающая кольцевая зона быстро прогреется и благодаря доплер-эффекту усилится поглощение нейтронов отражателя, без которых активная зона подкритична. Это приведет к замедлению цепной реакции деления в активной зоне. Таким образом, повысится безопасность быстрого реактора.

Исключение внешнего топливного цикла

Поскольку утечка в пустоту с внешней поверхности отражателя из ^{208}Pb оказывается довольно значительной, то целесообразно размещение за отражателем размножающей кольцевой зоны с формированием в ней резонансно-эпитеплового спектра нейтронов. В такой связанной системе двух активных зон открывается возможность прямого использования избыточных нейтронов быстрой активной зоны в зоне со смягченным спектром нейтронов. Тем самым может быть реализована возможность использования накапливаемого горючего в зоне со смягченным спектром нейтронов, по существу, минуя операции внешнего топливного цикла. Следовательно, в такой связанной системе будут совмещены функции быстрого и теплового реакторов. Хотя при этом зона со смягченным спектром нейтронов будет использовать более сложную жидкометаллическую технологию, чем в легководных реакторах с жидкой водой на основе ВВЭР и PWR. Тем не менее, исключение внешнего топливного цикла может оказаться перспективным. Заметим, что подобная идея обсуждалась в работах [18 – 21], однако с использованием довольно тонкого отражателя из природного урана, придвинутого вплотную к быстрой активной зоне, а с наружной стороны подпертой бериллиевым замедлителем и обедненным ураном высокой плотности.

РЕСУРСЫ ^{208}Pb

В недрах имеются обычный свинец с постоянным изотопным составом (1.4% ^{204}Pb , 24.1% ^{206}Pb , 22.1% ^{207}Pb и 52.4% ^{208}Pb), а также радиогенный свинец с разнообразным изотопным составом, так как изотопы ^{208}Pb , ^{206}Pb и ^{207}Pb являются конечными продуктами цепочек радиоактивного распада, начинающихся с ^{232}Th , ^{238}U и ^{235}U соответственно. Следовательно, радиогенный свинец с большим содержанием в нем ^{208}Pb (более 90%) может быть добыт в месторождениях ториевых и торий-урановых руд [22, 23] без изотопного разделения. Однако расчеты показали, что для сохранения преимуществ ^{208}Pb содержание в радиогенном свинце изотопов ^{204}Pb и ^{207}Pb , которые характеризуются значительным сечением поглощения,

должно быть менее 1%. Предприятие Госкорпорации «Росатом» всерегиональное объединение «Изотоп» предлагает услуги по обогащению свинца по изотопу ^{208}Pb до 99.8% [24].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что нейтронно-ядерные свойства ^{208}Pb приводят к ряду особенностей кинетики быстрого реактора с таким отражателем, которые могут существенным образом повысить ядерную безопасность реактора.

Для реализации рассмотренных преимуществ по безопасности быстрого реактора допустимой является комбинация, при которой отражатель состоит из ^{208}Pb , а теплоноситель – из радиогенного свинца.

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-79-10334).

Литература

1. Белл Д., Глестон С. Теория ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1974. – 494 с.
2. Shmelyov A.N., Koulikov G.G., Glebov V.B., Tsurickov D.F., Morozov A.G., Kuznetsov V.V. On actinides transmutation possibility in fast reactors with various coolants. Nuclear Energy Agency Committee on Reactor Physics of the USA (NEACRP-A-1112), Section B.2.3.
3. Шмелев А.Н., Куликов Г.Г., Глебов В.Б., Цуриков Д.Ф., Морозов А.Г. Безопасность быстрого реактора-выжигателя долгоживущих актиноидов, извлеченных из радиоактивных отходов. // Атомная энергия. – 1992. – Т. 73. – Вып. 6. – С. 450-454.
4. Shmelev A.N., Kulikov G.G., Glebov V.B., Tsurikov D.F., Morozov A.G. Safety in a fast burning reactor for long-lived actinides extracted from radioactive wastes. // Atomic Energy. – 1992. – Vol. 73. – No. 6. – PP. 963-966.
5. Shmelev A.N., Kulikov G.G., Apse V.A., Glebov V.B., Tsurikov D.F., Morozov A.G. Radioactive waste transmutation in nuclear reactors. / Proc. of the International working group on fast reactors specialists meeting on: «Use of fast reactors for actinide transmutation». Obninsk, IPPE, Russia, 22-24 September 1992. – IAEA-TECDOC-693. – 1993. – PP. 77-86.
6. Shmelev A.N., Kulikov G.G., Apse V.A., Kulikov E.G., Artsyuk V.V. Radiogenic Lead with Dominant Content of ^{208}Pb : New Coolant and Neutron Moderator for Innovative Nuclear Facilities. // Internet journal of Hindawi Publishing Corporation: Science and Technology of Nuclear Installations. – 2011. – Article ID 252903. – 12 p. Электронный ресурс: <http://www.hindawi.com/journals/stni/2011/252903/> (дата доступа 01.02. 2019).
7. Shmelev A.N., Kulikov G.G., Kryuchkov E.F., Apse V.A., and Kulikov E.G. Application of Radiogenic Lead with Dominant Content of ^{208}Pb for Long Prompt Neutron Lifetime in Fast Reactor. // Nuclear Technology. – 2013. – Vol. 183. – No. 3. – PP. 409-426.
8. Исаков А.И., Казарновский М.В., Медведев Ю.А., Метелкин Е.В. Нестационарное замедление нейтронов (основные закономерности и некоторые приложения). Монография. – М.: Наука, 1984. 264 с.
9. Бекури К., Виртц К. Нейтронная физика. Пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1968. 456 с.
10. Физические величины: Справочник. / Под. ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
11. Soppera N., Bossant M., Dupont E. JANIS 4: An Improved Version of the NEA Java-based Nuclear Data Information System. // Nuclear Data Sheets. – 2014. – Vol. 120. – PP. 294-296.
12. Бекман И.Н. Ядерная физика (курс лекций): учебное пособие. – М.: Изд-во МГУ им. М.В.Ломоносова, 2010. – 398 с.
13. Кузьмин А.В. Основы теории переноса нейтронов (лабораторный практикум): учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – 192 с.
14. Марченко Л.В., Сергеев Ю.А. Расчет квадрата длины замедления для различных сред в

- 18- и 26-групповых приближениях и их сравнение с экспериментальными данными. // Бюллетень центра по ядерным данным. – М.: Атомиздат, 1969. – Вып. 6. – С. 319-390.
15. *Кабанова М.А., Кузьмин А.В.* Расчет возраста нейтронов деления до индиевого резонанса в натрии методом групп. // Труды Конференции Национального исследовательского Томского политехнического университета. Секция 4. «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность» – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – С. 38-41,
16. *Апсэ В.А., Шмелев А.Н.* Использование программы TIME26 в курсовом проектировании быстрых реакторов и электроядерных установок. Учебно-методическое пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2008. 63 с.
17. *Блинкин В.Л., Новиков В.М.* Жидкосольевые ядерные реакторы. – М.: Атомиздат, 1978. – 112 с.
18. *Kobayashi K.* Rigorous derivation of nodal equations for coupled reactors. // Annals of Nuclear Energy. – 1991. – Vol. 18. – Issue 1. – PP. 13-18.
19. *Avery R.L.* Coupled fast thermal power breeder. // Nucl. Sci. & Eng. – 1958. – Vol. 3. – No. 2. – PP. 129-144.
20. *Avery R.L.* Theory of coupled reactors. / Proc. of the II Intern. Conf. on Peaceful Uses of Atomic Energy. Geneva. – 1958. – Vol. 2. – P. 182.
21. *Эйвери Р., Брениан К., Брансон Дж., Кон К., Фишер Дж., Хаммел Х., Като В., Керн Ф., Манегетти Д., Тальготт Ф., Топпел Б.* Критический эксперимент с энергетическим реактором-размножителем связанного типа на тепловых и быстрых нейтронах. / Труды II Межд. конф. по мирному использованию атомной энергии. Женева-1958. Избранные доклады иностранных ученых. Физика ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1959. – С. 231-258.
22. *Godoy J.M., Godoy M.L., Aronne C.C.* Application of inductively coupled plasma quadrupole mass spectrometry for the determination of monazite ages by lead isotope ratios. // Journal of Brazilian Chemistry Society. – 2007. – Vol. 18. – No. 5. – PP. 969-975.
23. Каталог изотопных данных минералов украинской плиты. – Киев: Наукова думка, 1978. С. 90-137.
24. АО «Всерегionalное объединение «ИЗОТОП». Свинец-208. Электронный ресурс: www.isotop.ru/view/1941/ (дата доступа 01.02. 2019).

Поступила в редакцию 04.02.2019 г.

Авторы

Куликов Геннадий Генрихович, инженер

E-mail: ggkulikov@mephi.ru

Шмелев Анатолий Николаевич, профессор

E-mail: shmelan@mail.ru

Апсэ Владимир Александрович, заведующий НИС

E-mail: apseva@mail.ru

Куликов Евгений Геннадьевич, доцент

E-mail: egkulikov@mephi.ru

SAFETY OF A FAST REACTOR WITH A REFLECTOR CONTAINING A MODERATOR WITH HEAVY ATOMIC WEIGHT AND WEAK NEUTRON ABSORPTION

Kulikov G.G., Shmelev A.N., Apse V.A., Kulikov E.G.

NRNU MEPhI

31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409 Russia

ABSTRACT

The purpose of the study is to justify the possibility of improving the safety of fast reactors by surrounding their cores with reflectors made of material with special neutron-physical properties.

Such properties of the ^{208}Pb lead isotope as heavy atomic weight, small absorption cross section, and high inelastic scattering threshold lead to some peculiarities in neutron kinetics of the fast reactor with a ^{208}Pb reflector, which can significantly improve the reactor safety.

The reflector will also make it possible to generate additional delayed neutrons, which are characterized by «dead» time. This will increase the resistibility of the fission chain reaction to reactivity jumps and exclude prompt supercriticality. Note that the additional delayed neutrons can be generated by the reactor designers.

The relevance of the study is that the generation of additional delayed neutrons in the reflector will make it possible to reduce the consequences of a reactivity accident even if the reactivity introduced exceeds the effective fraction of delayed neutrons. At the same time, the role of the fraction of delayed neutrons as the maximum permissible reactivity for reactor safety is depreciated.

The scientific novelty of the study is that the problem of the formation of additional neutrons, which in their properties are close to traditional delayed neutrons, has not been posed so far. The authors propose a new method for improving the safety of fast reactors by replenishing the fraction of delayed neutrons due to the time delay of prompt neutrons during their transfer in the reflector.

To implement the considered advantages, the following combination is acceptable: lead enriched by ^{208}Pb is used as a neutron reflector while natural lead or other material (sodium, etc.) is used as a coolant in the reactor core.

Key words: nuclear safety, reactivity accident, delayed neutrons, fast reactor, radiogenic lead.

REFERENCES

1. Bell G.J., Glasstone S. *Nuclear reactor theory*. Van Nostrand Reinhold Company, 1970. 494 p.
2. Shmelyov A.N., Koulikov G.G., Glebov V.B., Tsurickov D.F., Morozov A.G., Kuznetsov V.V. *On actinides transmutation possibility in fast reactors with various coolants*. Nuclear Energy Agency Committee on Reactor Physics of the USA (NEACRP-A-1112), Section B.2.3.
3. Shmelev A.N., Kulikov G.G., Glebov V.B., Tsurikov D.F., Morozov A.G. Safety of fast reactor-burner of long-lived actinides extracted from radioactive wastes. *Atomnaya Energiya*. 1992, v. 73, no. 6, pp. 450-454 (in Russian).
4. Shmelev A.N., Kulikov G.G., Glebov V.B., Tsurikov D.F., Morozov A.G. Safety in a fast burning reactor for long-lived actinides extracted from radioactive wastes. *Atomic Energy*. 1992, v.

73, no. 6, pp. 963-966.

5. Shmelev A.N., Kulikov G.G., Apse V.A., Glebov V.B., Tsurikov D.F., Morozov A.G. Radioactive waste transmutation in nuclear reactors. *Proc. of the International working group on fast reactors specialists meeting on: «Use of fast reactors for actinide transmutation»*. Obninsk, IPPE, Russia, Sept. 22-24, 1992. IAEA-TECDOC-693, 1993, pp. 77-86.

6. Shmelev A.N., Kulikov G.G., Apse V.A., Kulikov E.G., Artisyuk V.V. Radiogenic Lead with Dominant Content of ^{208}Pb : New Coolant and Neutron Moderator for Innovative Nuclear Facilities. *Internet Journal of Hindawi Publishing Corporation: Science and Technology of Nuclear Installations*, 2011. Article ID 252903, 12 p. Available at: <http://www.hindawi.com/journals/stni/2011/252903/> (accessed Feb. 1, 2019).

7. Shmelev A.N., Kulikov G.G., Kryuchkov E.F., Apse V.A., and 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, pp. 409-426.

8. Isakov A.I., Kazarnovsky M.V., Medvedev Yu.A., Metelkin E.V. *Non-Stationary Neutron Slowing-Down (Basic Relationships and Some Applications)*. Monograph. Moscow. Nauka Publ., 1984, 264 p. (in Russian).

9. Bekurtz K., Wirtz K. *Neutron Physics*. Moscow. Atomizdat Publ., 1968, 456 p. (in Russian).

10. *Physical Values*. Handbook. Ed. Grigoriev I.S., Meylikhov E.Z. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1991, 1232 p. (in Russian).

11. Soppera N., Bossant M., Dupont E. JANIS 4: An Improved Version of the NEA Java-based Nuclear Data Information System. *Nuclear Data Sheets*. 2014, v. 120, pp. 294-296.

12. Beckman I.N. *Nuclear Physics (the Lecture Course)*. Training manual. Moscow. MGU Publ., 2010, 398 p. (in Russian).

13. Kuz'min A.V. *Fundamentals of Neutron Transport Theory (the Laboratorial Practicum)*. Training manual. Tomsk. TPU Publ., 2007, 192 p. (in Russian).

14. Marchenko L.V., Sergeev Yu.A. Determination of squared neutron slowing-down length for various materials in 18-group and 26-group approximations. Comparison with experimental results. *Bulletin of Nuclear Data Center*. Moscow. Atomizdat Publ., 1969, no. 6, pp. 319-390 (in Russian).

15. Kabanova M.A., Kuz'min A.V. Determination of Fission Neutron Age Up to Indium Resonance in Sodium by Means of Group Method. *Proc. of the National Research Tomsk Polytechnic University Conference. Sect. 4 «Power Engineering, Effectiveness, Reliability, Safety»*. Tomsk. TPU Publ., 2014, pp. 38-41 (in Russian).

16. Apse V.A., Shmelev A.N. *Use of the Computer Code TIME26 in the Training Design of Fast Reactors and Accelerator-Driven Systems*. Training manual. Moscow. NRNU MEPhI Publ., 2008, 63 p. (in Russian).

17. Blinkin V.L., Novikov V.M. *Molten-Salt Nuclear Reactors*. Moscow. Atomizdat Publ., 1978, 112 p. (in Russian).

18. Kobayashi K. Rigorous derivation of nodal equations for coupled reactors. *Annals of Nuclear Energy*. 1991, v. 18, iss. 1, pp. 13-18.

19. Avery R.L. Coupled fast thermal power breeder. *Nuclear Science & Engineering*. 1958, v. 3, no. 2, pp. 129-144.

20. Avery R.L. Theory of Coupled Reactors. *Proc. of the II Intern. Conf. on Peaceful Uses of Atomic Energy*. Geneva, 1958, v. 2, p. 182.

21. Avery R.L., Branyan C.E., Brunson G.S., Cohn C.E., Fischer G.F., Hummel H.H., Kato W.V., Kirn F., Meneghetti D., Thalgott F.W., Toppel B.J. Critical Experiment with Power Reactor-Breeder of Coupled Type on Thermal and Fast Neutrons. *Proc. of the II Intern. Conf. on Peaceful Uses of Atomic Energy. Geneva. Selected papers of foreign scientists*. Moscow. Atomizdat Publ., 1959, pp. 231-258 (in Russian).

22. Godoy J.M., Godoy M.L., Aronne C.C. Application of Inductively Coupled Plasma

Quadrupole Mass Spectrometry for the Determination of Monazite Ages by Lead Isotope Ratios. *Journal of Brazilian chemistry society*. 2007, v. 18, no. 5, pp. 969-975.

23. *Catalog of Isotope Dates for Minerals of Ukrainian Shield*. Kiev. Naukova Dumka Publ., 1978, pp. 90-137 (in Russian).

24. JSC «All-Regional Association «IZOTOP». Lead-208. Available at: www.isotop.ru/view/1941/ (accessed Feb. 1, 2019) (in Russian).

Authors

Kulikov Gennady Genrikhovich, Engineer

E-mail: ggkulikov@mephi.ru

Shmelev Anatoly Nikolaevich, Professor

E-mail: shmelan@mail.ru

Apse Vladimir Aleksandrovich, Head of the Scientific and Research Sector

E-mail: apseva@mail.ru

Kulikov Evgeny Gennad'evich, Assistant Professor

E-mail: egkulikov@mephi.ru