

РАДИАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕМИКС-ТОПЛИВА ПРИ МНОГОКРАТНОМ РЕЦИКЛЕ В РЕАКТОРАХ ВВЭР-1000

Д.В. Постоварова, Н.В. Ковалев, М.С. Онегин, Б.А. Бибичев

АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина».

194021, Санкт-Петербург, 2-ой Муринский пр-т, 28



Выполнен расчет изменения изотопного состава для трех видов РЕМИКС-топлива в процессе кампании на реакторе ВВЭР-1000. Показано, что топливо типа РЕМИКС-А и РЕМИКС-А2 можно рециклировать больше пяти раз без существенного снижения его ядерной ценности. Рассчитана мощность эквивалентной дозы от ТВС со свежим РЕМИКС-топливом в зависимости от рецикла, а также от времени выдержки свежего топлива после его изготовления. Исследован относительный вклад от различных радионуклидов в мощность эквивалентной дозы. Приведены результаты расчетов накопления ^{232}U и четных изотопов Pu в зависимости от рецикла топлива.

Ключевые слова: РЕМИКС-топливо, топливный цикл, легководный реактор ВВЭР-1000, уран, плутоний, рециклирование урана, рециклирование плутония, изотопный состав, мощность эквивалентной дозы, ОЯТ.

ВВЕДЕНИЕ

Рециклирование регенерированного урана и плутония в тепловых реакторах может обеспечить более эффективное использование ядерного топлива, снижение объемов ОЯТ, предназначенных для захоронения, и уменьшение риска распространения ядерных материалов. Одним из вариантов замыкания ядерного топливного цикла при эксплуатации реакторов ВВЭР является использование РЕМИКС-топлива [1]. Однако известно, что рециклирование плутония ведет к накоплению его четных изотопов в топливе [2], а рециклирование урана приводит к накоплению ^{232}U [3]. И то, и другое приводит к ухудшению радиационных характеристик ТВС со свежим топливом. Использование РЕМИКС-топлива в реакторах ВВЭР предполагает рециклирование как урана, так и плутония. В статье приведены результаты расчета изменения мощности эквивалентной дозы вблизи ТВС с РЕМИКС-топливом при рециклировании. Мощность эквивалентной дозы вблизи ТВС является важной характеристикой радиационной опасности ядерного топлива. Ее знание требуется как при разработке транспортных контейнеров, так и при планировании перегрузочных работ в узле свежего топлива на атомной станции.

В работе рассмотрено три вида РЕМИКС-топлива: типы А, А2 и Б. РЕМИКС-А [1, 4] представляет собой неразделенную смесь регенерированных урана и плутония после добавления 17 – 20% по массе обогащенного природного урана (ОПУ) с содержанием 19,75% ^{235}U . Топливо РЕМИКС-А2 отличается от РЕМИКС-А более вы-

© Д.В. Постоварова, Н.В. Ковалев, М.С. Онегин, Б.А. Бибичев, 2016

соким содержанием плутония [5]. В расчетах принимается массовое содержание плутония в топливе РЕМИКС-А2 равным 3%. Такое увеличение плутония позволяет уменьшить добавку обогащенного урана после каждого рецикла. Третий тип – РЕМИКС-Б [6] изготавливается из отдельных продуктов урана и плутония, получаемых при переработке ОЯТ, при этом весь выделенный уран направляется на повторное обогащение, а затем добавляется к выделенному плутонию. Содержание плутония в данном топливе также составляет 3%. Топливо этого типа не рециклируется.

В работе рассчитывалось изменение нуклидного состава рассматриваемых типов РЕМИКС-топлива в процессе кампании на реакторе ВВЭР-1000. Расчеты выгорания топлива выполнялись по прецизионным программам методом Монте-Карло для бесконечной решетки ТВС. Рассчитывался четырехлетний цикл работы реактора. Эквивалентная доза от ТВС рассчитывалась методом Монте-Карло. Учитывался вклад нейтронов и гамма-излучения. Другие типы радиоактивного излучения (α - и β -) не вносят вклад в мощность дозы вблизи ТВС, поскольку электроны и α -частицы имеют малую длину пробега и задерживаются оболочкой твэла. Сравнивались мощности эквивалентной дозы для ТВС с разным типом РЕМИКС-топлива.

МНОГОКРАТНОЕ РЕЦИКЛИРОВАНИЕ ТОПЛИВА РЕМИКС-А И РЕМИКС-А2

Для расчета состава топлива после выгорания использовались программы MSU [7] и MURE [8] вместе с MCNP [9]. С целью сравнения работы программ расчеты выгорания топлива РЕМИКС-А выполнялись как в программном пакете MSU, так и в MURE+MCNP. После успешной верификации данных расчет выгорания топлива РЕМИКС-А2 выполнялся в MURE+MCNP, а выгорания РЕМИКС-Б – в MSU.

В расчете использовалась модель тепловыделяющей сборки ТВС-2М с зеркальными граничными условиями. Исходным материалом для создания РЕМИКС-топлива было выбрано урановое отработанное ядерное топливо ВВЭР-1000 с выгоранием 49,2 ГВт·сут/т ТМ (проектное среднее выгорание топлива в ТВС с исходным обогащением урана 4,33% при четырехлетнем топливном цикле). Время облучения ТВС – 1200 эффективных суток и время выдержки до изготовления регенерированного топлива – пять лет.

Для создания РЕМИКС-топлива необходимо выделить из исходного материала уран-плутониевый регенерат, его состав представлен в табл. 1.

Таблица 1

Изотопный состав исходного уран-плутониевого регенерата

| Состав | ^{238}U | ^{235}U | ^{236}U | ^{238}Pu | ^{239}Pu | ^{240}Pu | ^{241}Pu | ^{242}Pu |
|---------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Содержание, кг/т ТМ | 973,72 | 8,58 | 6,04 | 0,30 | 6,42 | 2,71 | 1,40 | 0,83 |
| Сумма, кг/т ТМ | 988,3 | | | 11,7 | | | | |

В расчетах исходным материалом в качестве топлива подпитки использовался уран постоянного состава с обогащением 19,75% (товарный продукт АО «СХК»), для подпитки в РЕМИКС-А2 помимо высокообогащенного урана использовался плутоний, выделенный из отработавшего топлива реакторов ВВЭР-440 (ПО «Маяк») со средним выгоранием 36 ГВт·сут/т ТМ. Изотопный состав добавляемого плутония приведен в табл. 2.

Глубина выгорания РЕМИКС-топлива была принята 49,2 ГВт·сут/т ТМ. Для всех рециклов состав «свежего» РЕМИКС-топлива подбирается таким образом, чтобы его эффективное обогащение было равно 4,95%. Эффективное обогащение топлива рассчитывается с учетом удельного содержания ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu в топливе и коэф-

фициентов компенсации содержания ^{236}U , ^{240}Pu и ^{242}Pu [10]. Результаты расчета выгорания топлива РЕМИКС-А для пяти рециклов приведены в табл. 3.

Таблица 2

Изотопный состав добавки плутония для РЕМИКС-А2

| Состав | ^{238}Pu | ^{239}Pu | ^{240}Pu | ^{241}Pu | ^{242}Pu |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Содержание, % | 1,3 % | 63,3 % | 25,1 % | 5,2 % | 5,1 % |

Таблица 3

Содержание (кг/т ТМ) U и Pu в топливе РЕМИКС-А

| Состав | Рецикл 1 | | Рецикл 2 | | Рецикл 3 | | Рецикл 4 | | Рецикл 5 | |
|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | До | После | До | После | До | После | До | После | До | После |
| ^{232}U | $2 \cdot 10^{-6}$ | $5 \cdot 10^{-6}$ | $5 \cdot 10^{-6}$ | $8 \cdot 10^{-6}$ | $7 \cdot 10^{-6}$ | $10 \cdot 10^{-6}$ | $8 \cdot 10^{-6}$ | $1 \cdot 10^{-5}$ | $9 \cdot 10^{-6}$ | $1 \cdot 10^{-5}$ |
| ^{234}U | 0,6 | 0,4 | 0,7 | 0,4 | 0,7 | 0,5 | 0,8 | 0,5 | 0,8 | 0,5 |
| ^{235}U | 47,9 | 14,5 | 48,5 | 16,1 | 49,4 | 17,2 | 50,1 | 18,0 | 50,7 | 18,5 |
| ^{236}U | 4,8 | 9,9 | 8,6 | 13,2 | 11,5 | 15,8 | 13,8 | 17,9 | 15,6 | 19,6 |
| ^{238}U | 937,6 | 907,4 | 929,5 | 899,7 | 923,9 | 894,6 | 91,8 | 890,7 | 916,7 | 887,7 |
| $\Sigma(\text{U})$ | 990,9 | 932,2 | 987,2 | 929,4 | 985,4 | 928,0 | 984,4 | 927,1 | 983,7 | 926,4 |
| Pu(чет) | 3,1 | 5,4 | 4,8 | 6,5 | 5,9 | 7,2 | 6,5 | 7,6 | 6,9 | 7,9 |
| Pu(нечет) | 6,0 | 9,6 | 8,0 | 10,6 | 8,8 | 11,0 | 9,2 | 11,3 | 9,4 | 11,5 |
| $\Sigma(\text{Pu})$ | 9,1 | 14,8 | 12,8 | 16,9 | 14,6 | 18,0 | 15,6 | 18,7 | 16,3 | 19,2 |
| Am+Cm | – | 1,4 | – | 1,8 | – | 2,0 | – | 2,1 | – | 2,2 |
| U + Pu | 1000 | 947,0 | 1000 | 946,3 | 1000 | 946,0 | 1000 | 945,8 | 1000 | 945,5 |
| Эф. Обогащ., % | 4,95 | 1,66 | 4,95 | 1,72 | 4,95 | 1,75 | 4,95 | 1,76 | 4,95 | 1,76 |

Так как концепция топлива РЕМИКС-А предполагает использование неразделенной смеси урана и плутония, то с каждым рециклом содержание плутония в топливе возрастает. Также видно, что с каждым рециклом «ухудшается» состав топлива: увеличивается концентрация ^{236}U , который снижает реактивность реактора, происходит снижение доли делящихся изотопов Pu (^{239}Pu и ^{241}Pu) и возрастание доли неделящихся изотопов Pu (^{240}Pu и ^{242}Pu). К пятому рециклу происходит увеличение доли четных изотопов плутония от 33 до 40%. Накапливается ^{232}U , продукты распада которого испускают жесткое гамма-излучение. После каждого рецикла увеличивается содержание америция и кюрия – интенсивных нейтронных источников.

Несмотря на некоторое ухудшение состава видно, что эффективное обогащение отработавшего топлива еще значительно превосходит эффективное обогащение природного урана, что свидетельствует о возможности дальнейшего рециклирования. При увеличении глубины выгорания до 60 ГВт-сут/т ТМ состав отработанного топлива после пятого рецикла будет непригоден для дальнейшего рециклирования.

В расчете состава топлива РЕМИКС-А2 в качестве свежего топлива следующего рецикла также использовалась смесь регенерированных урана и плутония. Причем количество подпитки из плутония определялось следующим условием – в свежем топливе должно быть 3% плутония. Обеспечение необходимого эффективного обогащения топлива достигалось подбором массовой доли подпитки из высокообога-

щенного урана. Результаты расчета состава топлива РЕМИКС-А2 для пяти рециклов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Содержание (кг/т ТМ) U и Pu в топливе РЕМИКС-А2

| Состав | Рецикл 1 | | Рецикл 2 | | Рецикл 3 | | Рецикл 4 | | Рецикл 5 | |
|------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | До | После | До | После | До | После | До | После | До | После |
| ²³² U | 2,4·10 ⁻⁶ | 6,6·10 ⁻⁶ | 5,8·10 ⁻⁶ | 9,8·10 ⁻⁶ | 8,7·10 ⁻⁶ | 1,2·10 ⁻⁵ | 1,1·10 ⁻⁵ | 1,4·10 ⁻⁵ | 1,3·10 ⁻⁵ | 1,6·10 ⁻⁵ |
| ²³⁵ U | 40,0 | 16,5 | 44,8 | 18,9 | 46,7 | 19,9 | 47,9 | 20,5 | 48,8 | 21,0 |
| ²³⁶ U | 4,9 | 8,7 | 7,7 | 11,6 | 10,3 | 14,2 | 12,6 | 16,3 | 14,5 | 18,1 |
| ²³⁸ U | 925,1 | 895,2 | 917,5 | 888,2 | 912,9 | 883,9 | 909,5 | 880,6 | 906,7 | 878,0 |
| Σ(U) | 970,0 | 920,4 | 970,0 | 918,7 | 970,0 | 917,9 | 970,0 | 917,4 | 970,0 | 917,0 |
| Pu(чет) | 9,6 | 10,6 | 11,9 | 11,6 | 12,7 | 12,1 | 13,1 | 12,5 | 13,3 | 12,7 |
| Pu(нечет) | 20,4 | 15,3 | 18,2 | 15,1 | 17,4 | 15,0 | 17,0 | 14,9 | 16,7 | 14,9 |
| Σ(Pu) | 30,0 | 25,9 | 30,0 | 26,7 | 30,0 | 27,1 | 30,0 | 27,4 | 30,0 | 27,6 |
| Am+Cm | – | 2,7 | – | 3,2 | – | 3,3 | – | 3,4 | – | 3,4 |
| U + Pu | 1000,0 | 948,9 | 1000,0 | 948,6 | 1000,0 | 948,3 | 1000,0 | 948,2 | 1000,0 | 948,0 |
| Эф. обогащ., % | 4,95 | 2,04 | 4,95 | 2,11 | 4,95 | 2,10 | 4,95 | 2,08 | 4,95 | 2,06 |

Эффективное обогащение после пятого рецикла несколько выше, чем в случае с РЕМИКС-А, соответственно топливо также можно продолжать рециклировать. В сравнении с расчетным составом топлива РЕМИКС-А можно выделить следующие особенности: к пятому рециклу происходит немного большее увеличение доли четных изотопов плутония от 32 до 44%, увеличивается содержание ²³⁵U, происходит большее накопление америция с кюрием.

В обоих вариантах РЕМИКС-топлива при рециклировании происходит накопление ²³²U и четных изотопов плутония. На рисунках 1, 2 представлено содержание этих изотопов в свежем топливе в зависимости от количества рециклов. Увеличение доли этих изотопов приводит к росту мощности дозы от свежего топлива. Для уточнения увеличения мощности дозы из-за рециклирования урана и плутония был проведен расчет эквивалентной мощности дозы от ТВС со свежим топливом.

Расчет мощностей нейтронного и гамма-излучений проводился с помощью программы MCNP, при этом нейтронные спектры рассчитывались по программе MCU5, а гамма-спектры – по программе EASY-2010 [11].

В расчетах нейтронного источника учитывались нейтроны спонтанного деления актинидов и нейтроны из (α, n)-реакций на кислороде, входящем в состав топлива. При определении спектрального состава и интенсивностей источников гамма-излучения учитывались как радионуклиды, изначально входящие в состав топлива, так и дочерние продукты распада. Рассчитанный таким образом источник нейтронов и гамма-квантов равномерно распределялся по всему объему ядерного топлива ТВС, после чего методом Монте-Карло рассчитывалась эквивалентная доза вокруг ТВС.

Для расчета была выбрана модель тепловыделяющей сборки ТВС-2М. Мощность доз радиоактивного излучения рассчитывалась на расстоянии 30 см от грани сборки (рис. 3).

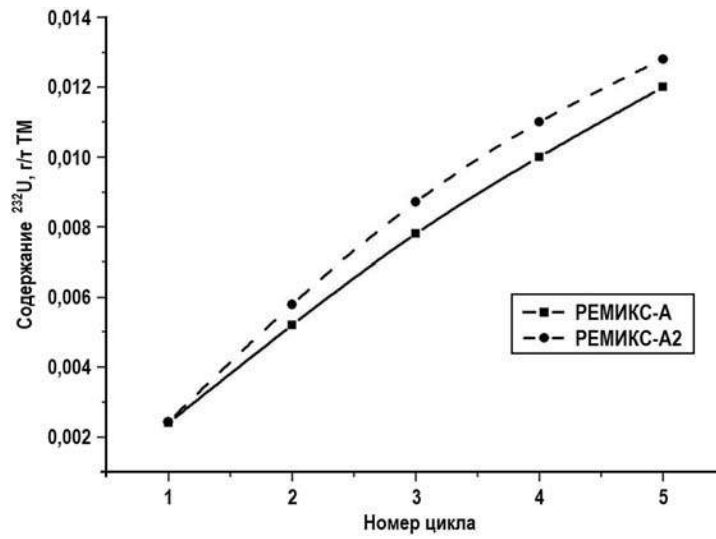


Рис. 1. Содержание ^{232}U в свежем топливе РЕМИКС-А и РЕМИКС-А2 в зависимости от рецикла

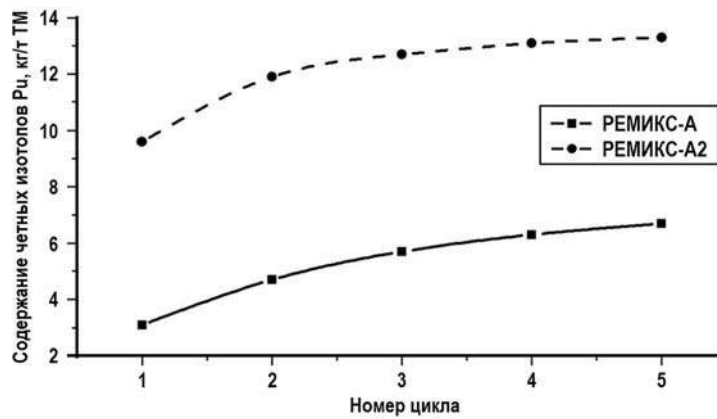


Рис. 2. Содержание четных изотопов плутония в свежем топливе РЕМИКС-А и РЕМИКС-А2 в зависимости от рецикла

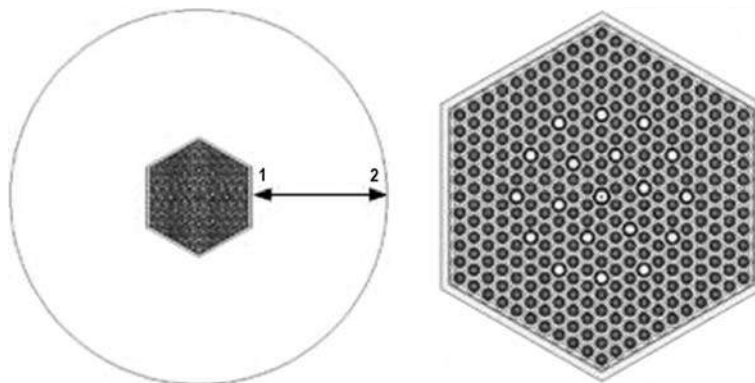


Рис. 3. ТВС ВВЭР-1000. Расчет проводился в точках 1 (на поверхности) и 2 (30 см от поверхности)

Мощность дозы выгоревшего топлива рассчитывалась для первого рецикла при выгорании 49,2 ГВт·сут/т ТМ. Полученные результаты представлены в табл. 5.

Таблица 5

Мощность дозы ионизационного излучения на 30 см от поверхности ТВС

| Состав ТВС | UO ₂ | РЕМИКС-А | РЕМИКС-А2 | РЕМИКС-Б |
|---|----------------------|----------------------|-----------|----------|
| Свежее топливо, мкЗв/ч | 5 | 65 | 196 | 214 |
| Свежее топливо с выдержкой 0,5 года, мкЗв/ч | 23 | 143 | 314 | 368 |
| Выгоревшее топливо без выдержки, Зв/ч | 6,95·10 ⁴ | 6,95·10 ⁴ | 686 | – |
| Выгоревшее топливо с выдержкой 0,5 года, Зв/ч | 586 | 584 | 583 | – |
| Выгоревшее топливо с выдержкой 5 лет, Зв/ч | 98 | 98 | 99 | 138 |

Для топлива РЕМИКС-А и РЕМИКС-А2 мощность дозы была рассчитана для свежего топлива каждого из 5 рециклов, время выдержки топлива принималось равным 180 дней. Полученные данные приведены на рис. 4.

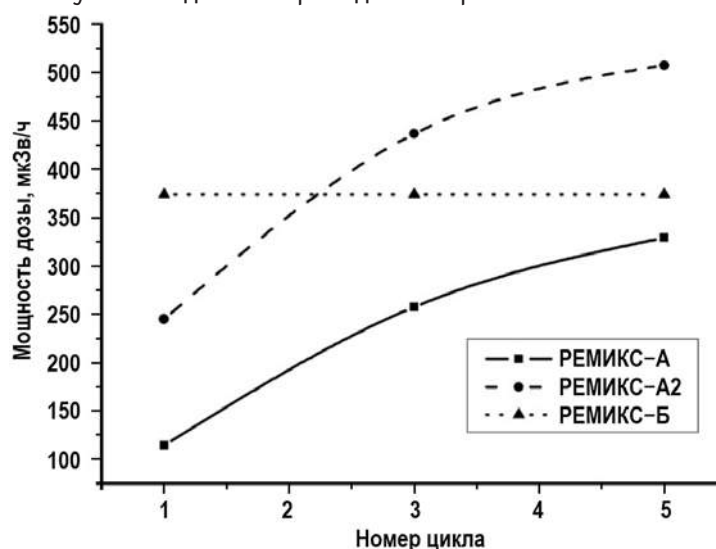


Рис. 4. Мощность эквивалентной дозы от ТВС со свежим топливом РЕМИКС для пяти рециклов на расстоянии 30 см от ее поверхности

Основной вклад в мощность дозы вносят гамма-кванты, нейтроны спонтанного деления изотопов плутония и нейтроны из реакций (α , n). Рисунок 5 показывает вклад в мощность эквивалентной дозы каждого изотопа урана и плутония в отдельности для свежего топлива РЕМИКС-А первого рецикла. Из рисунка видно, что основной вклад в γ -излучение вносят ²³²U и ²⁴¹Pu. Непосредственно сами эти изотопы вносят малый вклад в мощность γ -излучения. Основной вклад в мощность дозы вносят продукты их распада – ²⁰⁸Tl и ²⁴¹Am. Спонтанно делятся с выходом нейтронов, в основном, четные изотопы плутония. Плутоний, кроме того, распадается с выделением α -частиц, которые взаимодействуют с кислородом с образованием нейтронов.

На рисунке 6 отображен вклад в мощность эквивалентной дозы от ²³²U, ²⁴¹Pu и четных изотопов Pu для свежего топлива РЕМИКС-А в зависимости от рецикла. Из рисунка видно, что вклад от гамма-излучения от продуктов распада ²³²U и ²⁴¹Pu с рециклом увеличивается, но незначительно по сравнению с вкладом в мощность дозы от четных изотопов плутония.

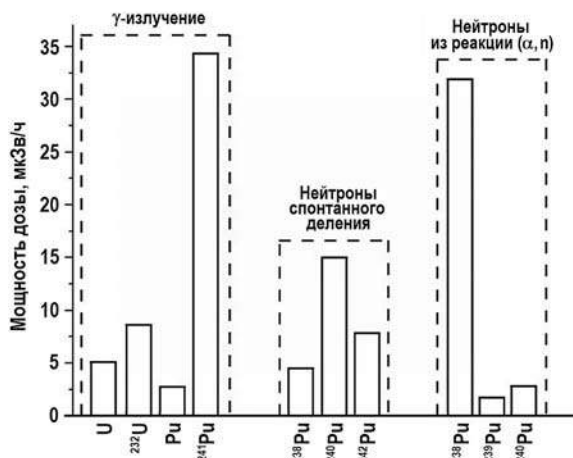


Рис. 5. Вклад в мощность эквивалентной дозы от изотопов урана и плутония

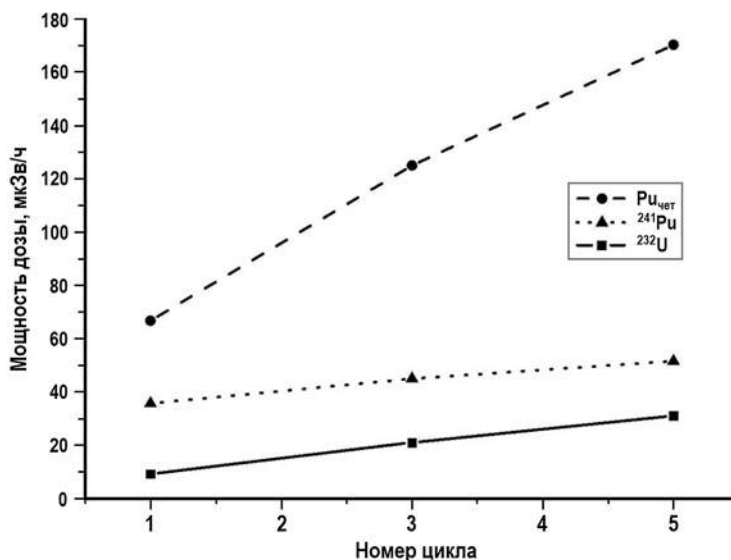


Рис. 6. Вклад от различных изотопов в мощность эквивалентной дозы от ТВС со свежим топливом РЕМИКС-А для пяти рециклов на расстоянии 30 см от поверхности

ТОПЛИВО РЕМИКС-Б

Рассмотрим вариант топлива РЕМИКС-Б. В основе этого топлива лежит полное разделение урана и плутония при переработке ОЯТ и последующее обогащение регенерированного урана. Состав получаемого таким образом свежего топлива приведен в табл. 6. Для исследования потенциала данного топлива был проведен расчет его выгорания для разных значений с помощью программы MSU5. Полученные результаты также представлены в табл. 6. Изотопный состав регенерированного урана топлива РЕМИКС-Б свидетельствует о его непригодности к последующему использованию в качестве топлива в замкнутом ЯТЦ тепловых реакторов без дополнительной очистки от ²³²U и ²³⁶U.

Для топлива РЕМИКС-Б были рассчитаны эквивалентные дозы от ТВС на расстоянии 30 см от поверхности. Полученные данные приведены в табл. 5 и на рис. 4. В процессе обогащения регенерированного урана в нем увеличивается содержание ²³²U и соответственно увеличивается вклад в мощность дозы от продуктов его рас-

пада по сравнению с топливом РЕМИКС-А. Также за счет увеличения доли плутония в топливе до 3% увеличивается вклад в мощность дозы от изотопов плутония (рис. 7).

Таблица 6

Содержание (кг/т ТМ) U и Pu в топливе РЕМИКС-Б

| Состав | Уран-плутониевое топливо, кг/т исходного топлива | | | | |
|---------------------|--|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | Свежее | Выгорание, ГВт-сут/т ТМ | | | |
| | | 49,2 | 60 | 65 | 70 |
| ^{232}U | $1,58 \cdot 10^{-5}$ | $1,62 \cdot 10^{-5}$ | $1,83 \cdot 10^{-5}$ | $1,94 \cdot 10^{-5}$ | $2,05 \cdot 10^{-5}$ |
| ^{235}U | 43,7 | 19,4 | 15,4 | 13,7 | 12,1 |
| ^{236}U | 22,0 | 25,8 | 26,1 | 26,2 | 26,2 |
| ^{238}U | 904,2 | 926,8 | 930,4 | 932,0 | 933,3 |
| $\Sigma(\text{U})$ | 970,0 | 972,0 | 972,0 | 971,9 | 971,8 |
| Pu(чет) | 10,5 | 12,2 | 12,8 | 13,0 | 13,3 |
| Pu(нечет) | 19,5 | 15,8 | 15,3 | 15,1 | 14,9 |
| $\Sigma(\text{Pu})$ | 30,0 | 28,0 | 28,0 | 28,1 | 28,2 |
| U + Pu | 1000,0 | 1000,0 | 1000,0 | 1000,0 | 1000,0 |
| Эф. обогащ., % | 4,65 | 1,66 | 1,18 | 0,99 | 0,80 |

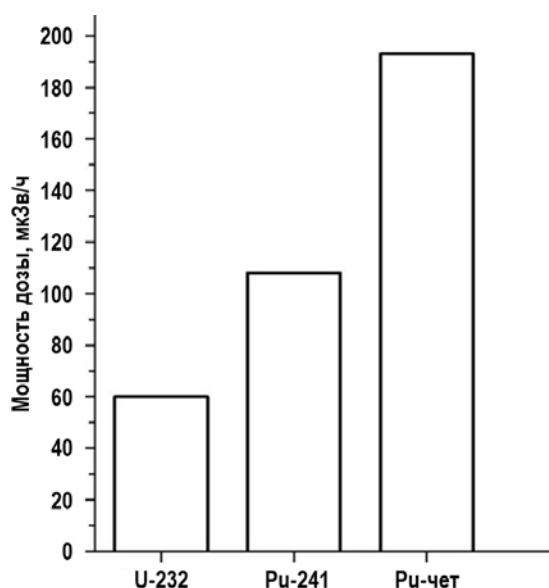


Рис. 7. Вклад в мощность эквивалентной дозы от изотопов урана и плутония для топлива РЕМИКС-Б

Поскольку содержание продуктов распада ^{232}U и ^{241}Pu (^{208}Tl и ^{241}Am соответственно) сильно зависит от времени выдержки топлива после изготовления, то дополнительно было проведено исследование изменения мощности эквивалентной дозы от ТВС со свежим РЕМИКС-топливом в зависимости от времени выдержки. Данное исследование было проведено на примере свежего топлива РЕМИКС-Б (состав приведен в табл. 6). Для этого с помощью программы EASY-2010 рассчитывались спектры гамма-излучения от свежего топлива для различного времени его

выдержки, а затем по программе MCNP рассчитывалась мощность эквивалентной дозы от ТВС с данным топливом. Полученные результаты приведены на рис. 8.

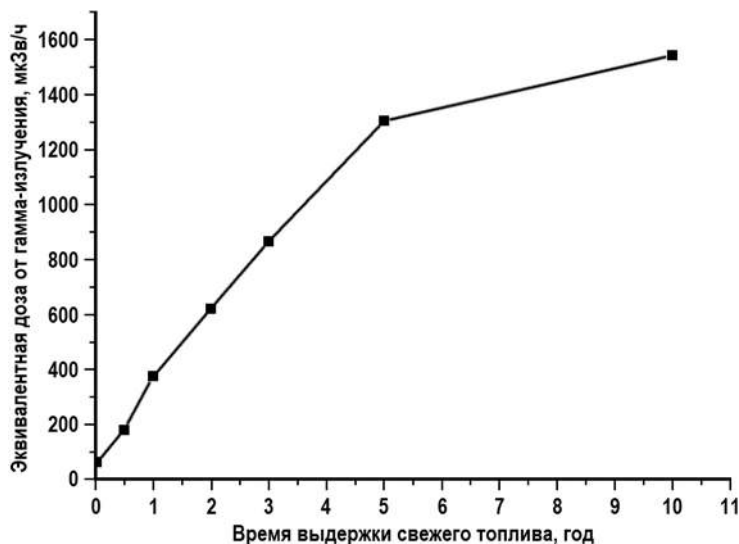


Рис. 8. Зависимость эквивалентной дозы гамма-излучения от ТВС со свежим топливом РЕМИКС-Б от времени выдержки свежего топлива после его изготовления

Из рисунка видно, что мощность эквивалентной дозы от свежего РЕМИКС-топлива сильно возрастает со временем его выдержки, поэтому в целях минимизации мощности дозы от ТВС со свежим РЕМИКС-топливом необходимо максимально сократить время от его изготовления до загрузки в реактор.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассчитаны изменения изотопного состава свежего РЕМИКС-топлива трех типов в процессе его рециклирования в реакторах ВВЭР-1000. Показано, что топливо РЕМИКС-А и РЕМИКС-А2 можно рециклировать больше пяти раз без существенного снижения его ядерной ценности.

Рециклирование урана и плутония ведет к увеличению мощности эквивалентной дозы от свежего топлива. Наибольший вклад в мощность дозы вносят четные изотопы плутония, количество которых в топливе увеличивается с каждым рециклом. Также существенный вклад в мощность дозы дают продукты распада ^{232}U и ^{241}Pu . Вклад от ^{232}U наиболее ощутим для топлива РЕМИКС-Б, так как его содержание увеличивается в процессе обогащения регенерированного урана.

В случае перехода на РЕМИКС-топливо вероятнее всего потребуется дополнительная защита персонала при изготовлении ТВС и при их транспортировке. Для минимизации вклада в мощность дозы от продуктов распада ^{232}U и ^{241}Pu в свежем РЕМИКС-топливе необходимо максимально сократить срок его поставки в реакторы.

Литература

1. Федоров Ю.С., Бибичев Б.А. и др. Использование регенерированного урана и плутония в тепловых реакторах // Атомная энергия. – 2005. – Т. 99. – № 2. – С. 136-141.
2. Nuclear Science. Physics of Plutonium Recycling. Volume VI. Multiple Pu Recycling in Advanced PWRs. NEA OECD. – 2002. ISBN: 92_64_19957_8. – P. 9.
3. Декусар В.М., Каграманян В.С. и др. Анализ характеристик РЕМИКС-топлива при многократном рецикле в реакторах ВВЭР // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2013. – №4. – С. 109-117.

4. Павловичев А.М., Павлов В.И. и др. Нейтронно-физические характеристики активной зоны ВВЭР-1000 со 100%-ной загрузкой топливом из регенерированного урана и плутония // Атомная энергия. – 2006. – Т. 101. – № 6. – С. 407-413.
5. Павловичев А.М., Павлов В.И. и др. Нейтронно-физические характеристики активной зоны реактора ВВЭР-1000 со 100%-ной загрузкой топливом из смеси регенерированного урана, плутония и обогащенного урана // Атомная энергия. – 2008. – Т. 104. – № 4. – С. 196-198.
6. Зильберман Б.Я., Федоров Ю.С. и др. Возможность использования топлива из смеси обогащенного регенерированного урана и регенерированного плутония для 100%-ной загрузки активной зоны ВВЭР-1000 // Атомная энергия. – 2012. – Т. 113. – Вып. 6. – С. 307-314.
7. Андросенко П.А., Алексеев Н.И. и др. MCU-FREE с банком данных MDBFREE50. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010613800. – 2010.
8. Meplan O., Wilson J. et al. MURE, MCNP Utility for Reactor Evolution, User Guide – Version 1.9 // Report LPSC 0912. – 2012.
9. X-5 Monte Carlo Team. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5 // Отчет Лос-Аламосской национальной лаборатории LA-UR-03-1987. – 2003.
10. Павловичев А.М., Павлов В.И., Бибичев Б.А. Нейтронно-физические характеристики активной зоны реактора ВВЭР-1000 со 100 %-ной загрузкой топливом из регенерированного урана и плутония // Отчет РНЦ «Кучатовский институт». – Инв. №32/1-118-405, М. – 2005.
11. Forrest R.A. The European Activation System: EASY-2007 overview. UKAEA FUS 533.

Поступила в редакцию 08.02.2016 г.

Авторы

Постоварова Дарья Владимировна, начальник лаборатории
E-mail: d.v.postovarova@khlopin.ru

Ковалёв Никита Владимирович, младший научный сотрудник
E-mail: kovalev@khlopin.ru

Онегин Михаил Сергеевич, ведущий инженер
E-mail: onegin@khlopin.ru

Бибичев Борис Анатольевич, ведущий научный сотрудник
E-mail: bibichev@khlopin.ru

UDC 621.039.5

RADIATION CHARACTERISTICS OF REMIX-FUEL MULTIRECYCLING IN VVER-1000 REACTOR

Postovarova D.V., Kovalev N.V., Onegin M.S., Bibichev B.A.

«V.G. Khlopin Radium Institute»

28, 2-nd Murinsky av., St.-Petersburg, 194021 Russia

ABSTRACT

In this article REMIX-fuel multirecycling in VVER-1000 reactor is considered. The REMIX-fuel is a mixture of regenerated uranium and plutonium with enriched uranium. Multirecycling of regenerated uranium and plutonium in thermal reactors can provide more effective use of nuclear fuel, reducing the volume of spent nuclear fuel destined for disposal, and reducing the risk of proliferation of nuclear materials. However, recycling of plutonium leads to accumulation of its non fissile isotopes, and recycling of uranium leads to accumulation of ^{232}U . This leads to deterioration of the radiation characteristics of fuel assemblies with fresh fuel. The changes in the isotopic composition of a three types of REMIX fuel during multirecycling in VVER-1000 reactor was calculated. It is shown that for REMIX-

A and REMIX-A2 fuel more than five recycling are possible without significantly fuel degradation. Equivalent dose from fresh REMIX fuel assembly was calculated depending on the number of cycles and on the time between fuel manufacture and fuel-rod loading. Equivalent dose near the fuel assembly is the important characteristic of radiation danger of nuclear fuel. The relative contribution of different radio nuclides to the equivalent dose was determined. Calculation results concerning the accumulation of ²³²U and non fissile Pu isotopes depending on the number of recycles are presented.

Keywords: REMIX fuel, fuel cycle, water-moderated water-cooled power reactor, uranium, plutonium, uranium multirecycling, plutonium multirecycling, isotope composition, equivalent dose, spent nuclear fuel.

REFERENCES

1. Fedorov Yu.S., Bibichev B.A., Zil'berman B.Ya., Kudryavtsev E.G. Use of regenerated uranium and plutonium in thermal reactors. *Atomic Energy*. 2005, v. 99, no. 2, pp. 572-576 (in Russian).
2. Nuclear Science. Physics of Plutonium Recycling. Volume VI. Multiple Pu Recycling in Advanced PWRs. NEA OECD. – 2002. ISBN: 92_64_19957_8, p. 9.
3. Dekusar V.M., Kagramanyan V.S., Kalashnikov A.G., Kapranova E.N., Korobitsyn V.E., Puzakov A. Yu. The comparison analyses of BBER REMIX-fuel characteristics when multiple recycling were made. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2013, no. 4, pp. 109-117 (in Russian).
4. Pavlovichev A.M., Pavlov V.I., Semchenkov Yu.M., Kudryavtsev E.G., Fedorov Yu.S., Bibichev B.A. Neutron-physical characteristics of a VVER core with 100% load of reprocessed uranium and plutonium fuel. *Atomic Energy*. 2006, v. 101, no. 6, pp. 863-868 (in Russian).
5. Pavlovichev A.M., Pavlov V.I., Semchenkov Yu.M., Kudryavtsev E.G., Fedorov Yu.S., Bibichev B.A., Zil'berman B.Ya. Neutron-physical characteristics of a VVER-1000 core with 100% fuel load consisting of a mixture of recovered uranium and plutonium and enriched uranium. *Atomic Energy*. 2008, v. 104, no. 4, pp. 257-261 (in Russian).
6. Zil'berman B.Ya., Fedorov Yu.S., Rimcky-Korsakov A.A., Bibichev B.A., Chubarov M.N., Alekseev P.N. Possibility of use of fuel consisting of mixture enriched recover uranium and recover plutonium in VVER-1000 core with 100% fuel load. *Atomic Energy*. 2012, v. 113, no. 6, pp. 307-314 (in Russian).
7. Androsenko P.A., Alekseev N.I., Bolshagin S.N. MCU-FREE s bankon dannih MDBFREE50. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registracii programmi dlya EVM № 2010613800. 2010 (in Russian).
8. Meplan O., Wilson J., Bidaud A., David S., Capellan N., Leniau B., Nuttin A., Havluj F., Vocka R., Chambon R., Michel-Sendis F., Perdu F., Perrot L. MURE, MCNP Utility for Reactor Evolution, User Guide – Version 1.9. Report LPSC 0912. – 2012.
9. X-5 Monte Carlo Team. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. Los Alamos National Laboratory. LA-UR-03-1987. 2003.
10. Pavlovichev A.M., Pavlov V.I., Bibichev B.A. Neutron-physical characteristics of a VVER core with 100% load of reprocessed uranium and plutonium fuel. Kurchatov Institute's report. №32/1-118-405. Moscow 2005 (in Russian).
11. Forrest R.A. The European Activation System: EASY-2007 overview. UKAEA FUS 533.

Authors

Postovarova Dar'ya Vladimirovna, Head of Laboratory

E-mail: d.v.postovarova@khlopin.ru

Kovalyov Nikita Vladimirovich, Junior Researcher

E-mail: kovalev@khlopin.ru

Onegin Mihail Sergeevich, Leading Engineer

E-mail: onegin@khlopin.ru

Bibichev Boris Anato'levich, Leading Researcher

E-mail: bibichev@khlopin.ru