

# ОЦЕНКА НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА ВВЭР-1000 ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕГЕНЕРИРОВАННОГО УРАН-ПЛУТОНИЕВОГО ТОПЛИВА

**В.В. Семишин**

*МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1*



Рассмотрена возможность формирования топливных загрузок для реактора ВВЭР-1000 на основе регенерированного топлива с применением ОЯТ, наработанного на реакторах аналогичного вида. Проведено исследование изменения изотопного состава выгружаемого из теплового реактора плутония при его многократной переработке и повторном использовании в реакторе на тепловых нейтронах. Для полученного равновесного изотопного состава реакторного плутония выполнены трехмерные нейтронно-физические расчеты топливных кампаний стационарных топливных загрузок серийного реактора ВВЭР-1000 с обычным оксидным топливом и оксидным топливом на основе регенерированного урана и на основе неразделенной смеси оксидов урана и плутония из ОЯТ. Выполнено сравнение нейтронно-физических характеристик активных зон для указанных видов топлива в ходе топливной кампании, таких как: радиальные профили энерговыделения в активной зоне, значения коэффициентов реактивности по различным теплотехническим параметрам, эффективности органов управления реактивностью и т.д.

**Ключевые слова:** нейтронно-физический расчет, активная зона, ВВЭР, РЕМИКС-топливо, САПФИР, ДЕСНА, замкнутый ядерный топливный цикл, плутоний, регенерат урана.

*Семишин В.В.* Оценка нейтронно-физических свойств активной зоны реактора ВВЭР-1000 при использовании регенерированного уран-плутониевого топлива. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 2. – С. 15-26. DOI: <https://doi.org/10.26583/пре.2023.2.02> .

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире не решена полностью проблема хранения и обращения с накопленным в ходе эксплуатации энергетических реакторов ОЯТ. Ежегодно из реакторов выгружается около 10 тыс. тонн ОЯТ [1, 2], при этом, из этого количества на переработку отправляется около 2 тыс. тонн топлива. Основными странами, занимающимися переработкой ОЯТ, являются: Франция, в которой часть плутония, наработанного на реакторах PWR и BWR, идет на формирование топливных загрузок для реакторов PWR [3], Япония и Российская Федерация, где урановый регенерат из реакторов типа ВВЭР

© *В.В. Семишин, 2023*

используется для изготовления топлива для реакторов РБМК-1000 [4]. Мощности завода РТ-1 позволяют перерабатывать около 400 тонн ядерного топлива в год [5]. Большая часть стран, эксплуатирующих энергетические реакторы, либо относятся к ОЯТ как к конечному продукту топливного цикла (США, Финляндия), и, соответственно, рассматривают возможности его окончательного захоронения в геологических формациях, либо откладывают решение проблемы накопления ОЯТ и обращения с ним на неопределенный срок, храня его на пристанционных хранилищах.

Сокращение объемов накопленного в ходе эксплуатации энергетических реакторов ОЯТ возможно при его переработке и вовлечении в топливный цикл, что позволит расширить имеющуюся сырьевую базу. Реализация эффективных способов многократного повторного использования в реакторах типа ВВЭР регенерированного топлива позволит также сократить потребление природного урана при изготовлении топлива и сократить количество подлежащих окончательному захоронению радиоактивных отходов. С учетом времени, необходимого для масштабного введения в эксплуатацию реакторов на быстрых нейтронах, рецикл плутония в активных зонах реакторов на тепловых нейтронах позволит дать время на развитие технологий ядерных реакторов на быстрых нейтронах и интеграцию их в двухкомпонентную ядерную энергетику.

В работе рассматривается вариант замыкания топливного цикла только на реакторах на тепловых нейтронах и многократное повторное использование отработавшего ядерного топлива на АЭС с реактором ВВЭР-1000 на примере стационарных топливных загрузок. Расположение ТВС в активной зоне бралось в соответствии с [6]. Исследование проводилось для двух топливных циклов: топливный цикл с РЕМИКС-топливом, в котором используется неразделенная смесь оксидов урана и плутония из выгружаемого топлива, и топливный цикл на основе регенерированного урана, дообогащаемого  $^{235}\text{U}$ . При выполнении расчетов полагалось, что топливо полностью очищается от продуктов деления и минорных актинидов. Расчеты библиотек нейтронно-физических сечений выполнены по ПС САПФИР-95 [7, 8], нейтронно-физические расчеты активной зоны выполнены по трехмерному двухгрупповому нейтронно-теплогидравлическому модулю активной зоны ДЕСНА, входящему в состав ПС «Rainbow-TRP» [9]. В рамках обоснования возможности применения РЕМИКС-топлива в реакторах на тепловых нейтронах на Балаковской АЭС были установлены отдельные экспериментальные ТВС, содержащие твэлы с РЕМИКС-топливом. При выполнении нейтронно-физических исследований в данной работе был рассмотрен реактор ВВЭР-1000 с активной зоной, полностью состоящей из ТВС с топливом на основе регенерированного урана или на основе неразделенной уран-плутониевой смеси.

Для исследований стационарных топливных циклов со 100%-й загрузкой активной зоны регенерированным топливом было проведено исследование изменения изотопного состава топлива при многократном повторном использовании с целью получения равновесных концентраций изотопов плутония в используемом топливе [10]. Для определения состава РЕМИКС-топлива в установившемся топливном цикле было выполнено исследование изменения содержания изотопов плутония в топливе в зависимости от количества рециклов. Изменение изотопного состава плутония приведено на рис 1. После проведения 18-ти рециклов изотопный состав выгружаемого топлива изменяется в пределах расчетной погрешности, поэтому он был принят за равновесный состав перерабатываемого топлива. Расчет такого количества рециклов был необходим, поскольку даже после пяти рециклов в выгружаемом топливе продолжает заметно расти концентрация  $^{238}\text{Pu}$ . Одна из целей данной работы – показать, что даже в случае постоянного рецикла отработавшего топлива на реакторах типа ВВЭР с наименее благоприятным изотопным составом плутония, соответствующим равновесной концентрации сильнопоглощающих изотопов, и полной загрузке таким топливом активной зоны ее

нейтронно-физические характеристики позволяют добиться сопоставимых с урановым топливом характеристик. При рассматриваемых обычно трёх – пяти рециклах изотопный состав топлива более благоприятен.

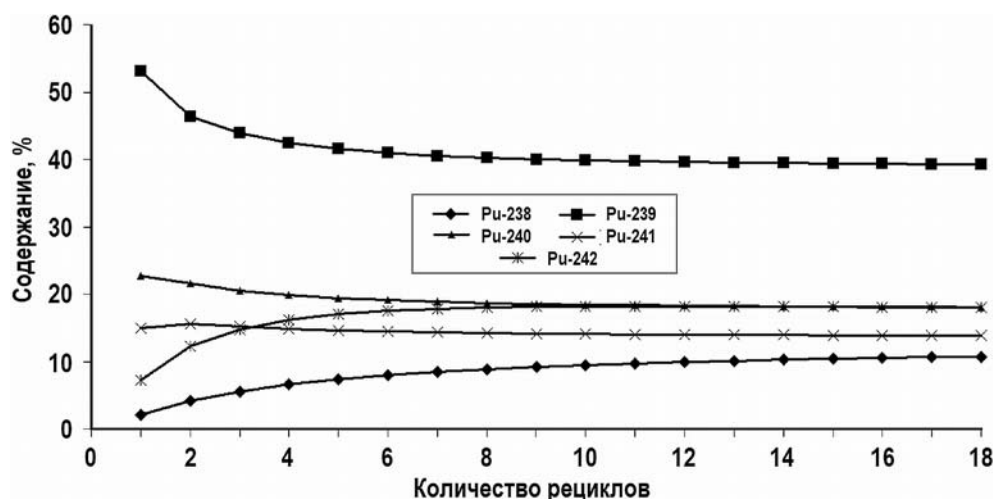


Рис. 1. Изменение изотопного состава плутония при многократном рециклировании

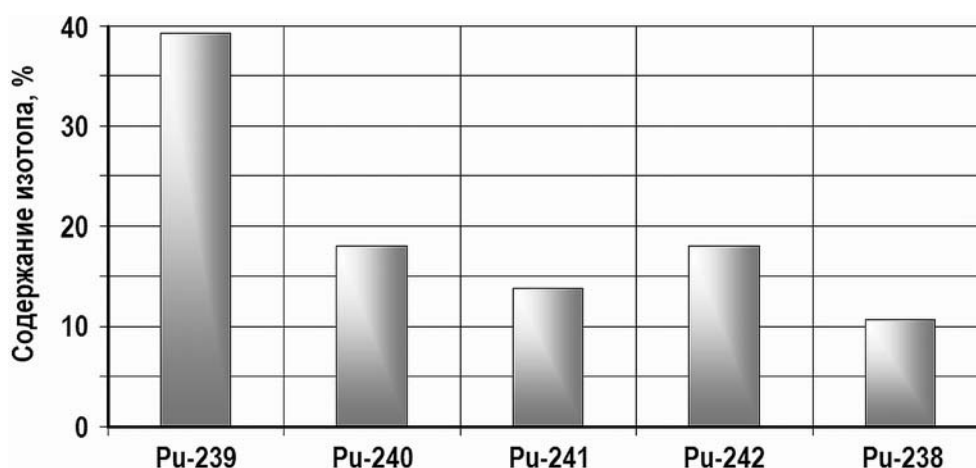


Рис. 2. Равновесный изотопный состав плутония в РЕМИКС-топливе

В перерабатываемом плутонии присутствуют сильнопоглощающие тепловые нейтроны изотопы плутония  $^{238}\text{Pu}$  и  $^{240}\text{Pu}$ . В процессе рециклирования топлива концентрация изотопа  $^{240}\text{Pu}$  выходит на равновесное содержание и далее в ходе рециклирования почти не меняется, однако концентрация изотопа  $^{238}\text{Pu}$  продолжает расти даже после большого количества рециклов. Это потребует постепенного увеличения обогащения по делящемуся изотопу для компенсации паразитного поглощения и повышения расхода топлива при многократных рециклах. Помимо ухудшения размножающих свойств топлива, наличие  $^{238}\text{Pu}$  приводит к повышенным по сравнению с топливом из свежего урана активности и тепловыделению. Этот факт приводит к необходимости обращения с невыгоревшими кассетами как с отработавшими, что усложняет технологические операции по перегрузкам реактора и транспортировке топлива с завода-изготовителя ТВС на станцию. Далее рассматривается стационарный топливный цикл, наступающий примерно через 30 лет после начала перехода на загрузки с РЕМИКС-топливом. Используемый для проведения дальнейших рас-

четов равновесный состав РЕМИКС-топлива приведен на рис. 2.

Переход на топливные загрузки с использованием регенерированного топлива осуществлялся в три этапа для постепенной замены всех ТВС с урановым топливом на ТВС с регенерированным топливом в соответствии с картограммой перегрузок стационарных топливных загрузок. Характеристики переходных загрузок и оптимизация схемы перегрузок не рассматривались. Сохранение проектной длительности топливной кампании при использовании регенерированного топлива обеспечивалось путем варьирования дообогащения РЕМИКС-топлива по делящемуся изотопу  $^{235}\text{U}$  для компенсации содержания  $^{236}\text{U}$ ,  $^{238}\text{Pu}$  и  $^{240}\text{Pu}$ . Таким образом, стационарный состав топлива для топливного цикла с использованием РЕМИКС-топлива имеет следующий состав:

- 5,85%  $^{235}\text{U}$  + 1,2% ( $^{239+241}\text{Pu}$ ) для ТВС со средним обогащением 4,9 %;
- 5,25%  $^{235}\text{U}$  + 1,2% ( $^{239+241}\text{Pu}$ ) для ТВС со средним обогащением 4,4 %.

Для топлива на основе дообогащенного регенерированного урана также был выполнен подбор необходимого обогащения по  $^{235}\text{U}$  для компенсации присутствия изотопа  $^{236}\text{U}$  и сохранения проектной длительности топливной кампании [11]. Необходимое обогащение составило

- 5,2%  $^{235}\text{U}$  для ТВС со средним обогащением 4,9 %;
- 4,6%  $^{235}\text{U}$  для ТВС со средним обогащением 4,4 %.

Нейтронно-физический расчет стационарных топливных циклов показал, что для сохранения длительности работы топливной загрузки при использовании регенерированного или РЕМИКС-топлива необходима более высокая концентрация борной кислоты на начало кампании, чем для уранового топлива. Значения критической концентрации борной кислоты на МКУ, номинальном уровне мощности и стояночная концентрация борной кислоты приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Концентрация борной кислоты в теплоносителе в различных режимах работы**

Параметр	Значение		
	Урановое топливо	РЕМИКС-топливо	Регенерат урана
$C_{\text{H}_2\text{BO}_3} (t = 0 \text{ сут}, N = 1000 \text{ МВт}), \text{ г/кг}$	7,7	9,2	8,0
$C_{\text{H}_2\text{BO}_3} (t = 0 \text{ сут}, N = 0 \text{ МВт}), \text{ г/кг}$	11,9	16,6	12,5
$C_{\text{H}_2\text{BO}_3} (\text{стояночная}), \text{ г/кг}$	< 16	20,5	14,5

Расчет полей энерговыделения показал, что в случае использования РЕМИКС- и регенерированного топлива не происходит превышения максимальной неравномерности поля энерговыделения в течение топливной кампании по сравнению с проектным топливным циклом. В случае топливного цикла с использованием РЕМИКС-топлива наблюдается снижение изменения максимальной неравномерности поля энерговыделения по сравнению с обычным топливом и топливом на основе регенерированного урана. Для обычного топлива и топлива на основе регенерированного урана максимальный коэффициент неравномерности составляет 1,35, в то время как для топливной загрузки на основе РЕМИКС-топлива он равен 1,26. При расчетах топливных загрузок с регенерированным топливом полагалось, что расположение твэлов с гадолинием в ТВС аналогично загрузкам с урановым топливом. Поля относительного энерговыделения для исследуемых топливных циклов на начало и конец топливной кампании приведены на рис. 3, 4, где для наглядности представлен сектор симметрии 30°.

Все коэффициенты реактивности для топливных загрузок с использованием РЕМИКС-топлива и топлива на основе регенерированного урана соответствуют требованиям приложения к Правилам ядерной безопасности реакторных установок атомных станций

НП-082-07. Изменение коэффициентов реактивности в течение работы топливной кампании для реактора на номинальном уровне мощности приведено на рис. 5, 6. Значения коэффициентов реактивности по температуре топлива, суммарного температурного коэффициента реактивности, по удельному объему теплоносителя являются отрицательными на протяжении всего времени топливной кампании.

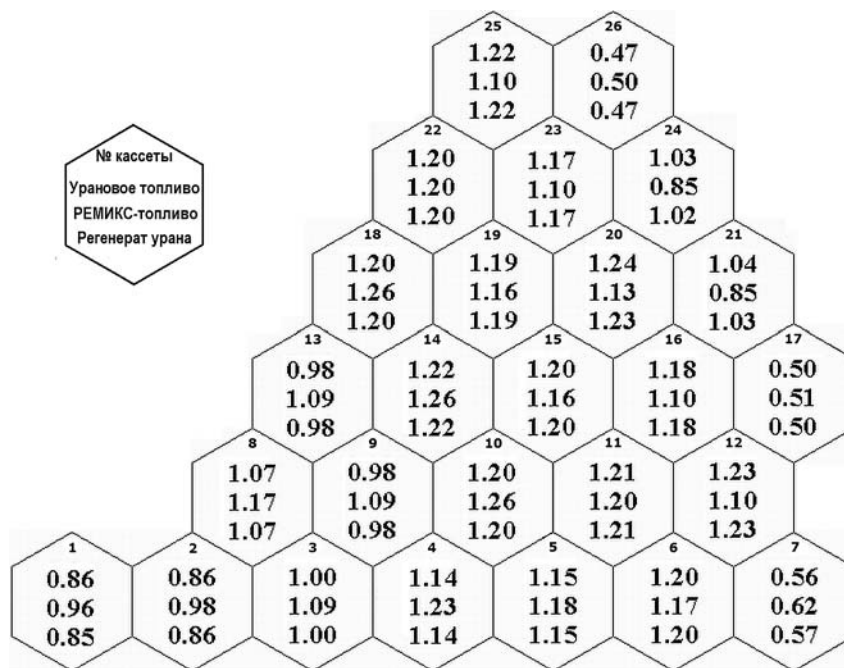


Рис. 3. Поле относительного покассетного энерговыделения на начало топливной кампании

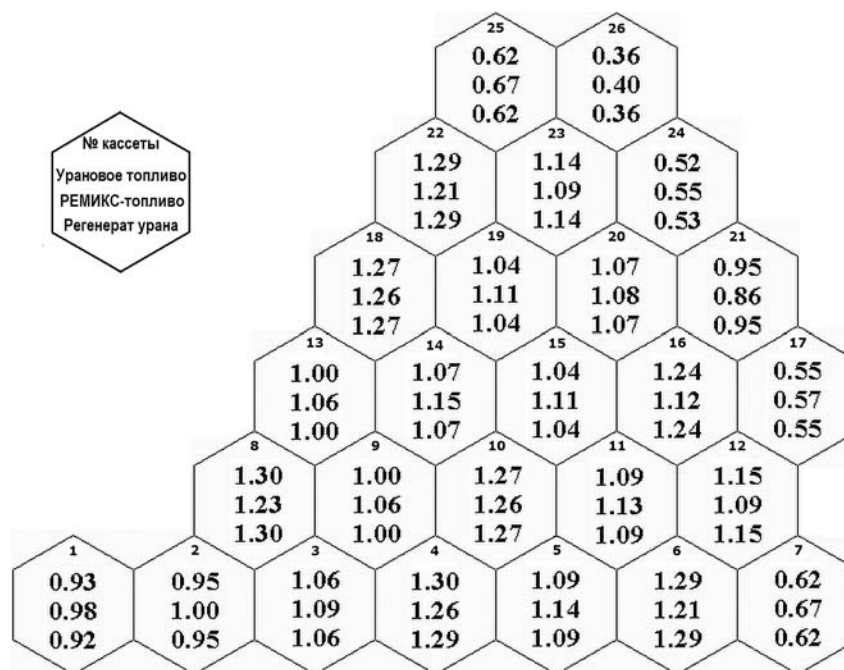


Рис. 4. Поле относительного покассетного энерговыделения на конец топливной кампании

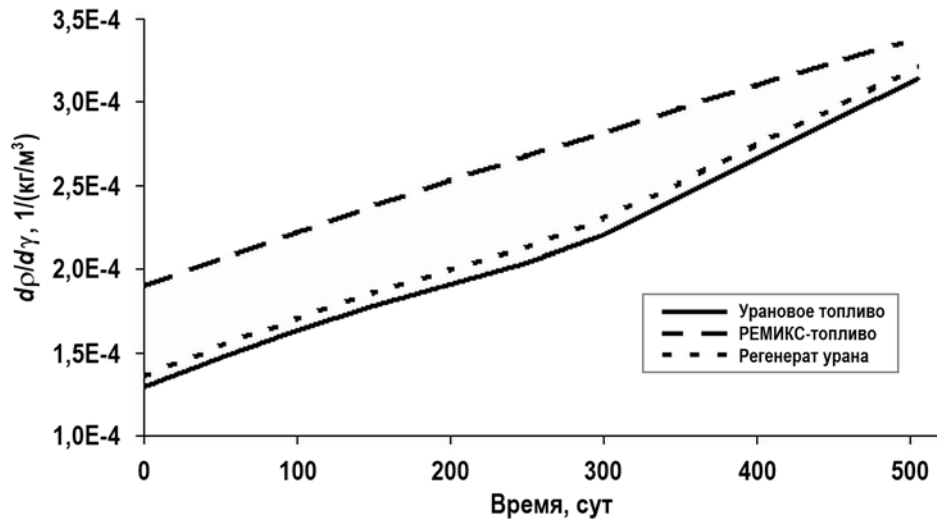


Рис. 5. Изменение коэффициента реактивности по плотности теплоносителя

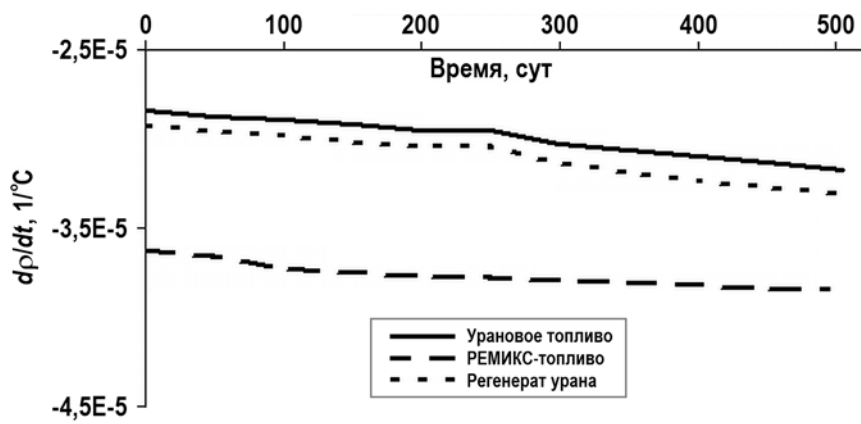


Рис. 6. Изменение коэффициента реактивности по температуре топлива

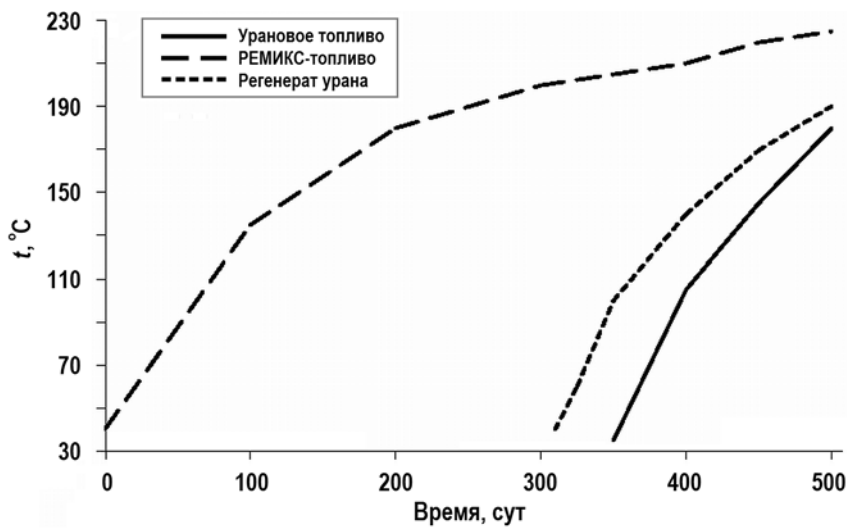


Рис. 7. Изменение температуры повторной критичности



При применении топливных циклов с РЕМИКС-топливом наблюдается увеличение абсолютных значений коэффициентов реактивности по температуре топлива, по плотности теплоносителя и суммарного температурного коэффициента реактивности, что, как следствие, увеличивает температуру повторной критичности. Изменение температуры повторной критичности в течение работы топливной кампании для исследуемых топливных циклов приведено на рис. 7.

Помимо возрастания температуры повторной критичности, сама возможность возникновения повторной критичности для исследуемого топливного цикла с РЕМИКС-топливом имеет место с самого начала топливной кампании, в то время как для стандартного топлива повторная критичность возможна только после 350 эффективных суток.

Расчеты интегральной эффективности регулирующей группы ОР СУЗ и аварийной защиты показали, что при использовании РЕМИКС-топлива происходит снижение эффективности аварийной защиты по сравнению со стандартным топливом. Значения интегральной эффективности регулирующей группы ОР СУЗ и аварийной защиты на начало и конец работы топливной кампании для реактора на номинальном уровне мощности и на МКУ приведены в таблицах 2, 3.

Таблица 2

**Интегральные эффективности регулирующей группы**

Параметр	Значение		
	Урановое топливо	РЕМИКС-топливо	Регенерат урана
Интегральная эффективность регулирующей группы на начало топливной кампании, %			
- $N = 0$ МВт	0,684	0,638	0,683
- $N = 1000$ МВт	0,712	0,629	0,707
Интегральная эффективность регулирующей группы на конец топливной кампании, %			
- $N = 0$ МВт	0,627	0,628	0,624
- $N = 1000$ МВт	0,615	0,593	0,611

Таблица 3

**Интегральные эффективности аварийной защиты**

Параметр	Значение		
	Урановое топливо	РЕМИКС-топливо	Регенерат урана
Интегральная эффективность аварийной защиты на начало топливной кампании, %			
- $N = 0$ МВт	7,44	5,91	7,35
- $N = 1000$ МВт	7,55	6,05	7,46
Интегральная эффективность аварийной защиты на конец топливной кампании, %			
- $N = 0$ МВт	7,08	6,09	7,04
- $N = 1000$ МВт	7,23	6,28	7,19

Для достижения проектного значения эффективности регулирующей группы ОР СУЗ и аварийной защиты потребуется применение обогащенного по  $^{10}\text{B}$  карбида бора в пэлах СУЗ или увеличения общего количества органов регулирования. Для загрузки на

основе РЕМИКС-топлива может применяться схема расположения ОР СУЗ реактора ВВЭР-1200. При использовании топлива на основе регенерированного урана не наблюдается снижения эффективности органов СУЗ.

Уменьшение интегральной эффективности органов регулирования при использовании РЕМИКС-топлива может быть вызвано ужесточением спектра нейтронов по сравнению с топливом на основе обогащенного урана. Расчеты спектров нейтронов в 26-групповом приближении для ТВС с обогащением 4,4% показали увеличение доли быстрых нейтронов в группах 1 – 11 и уменьшение доли тепловых нейтронов в 26-й группе (рис. 8).

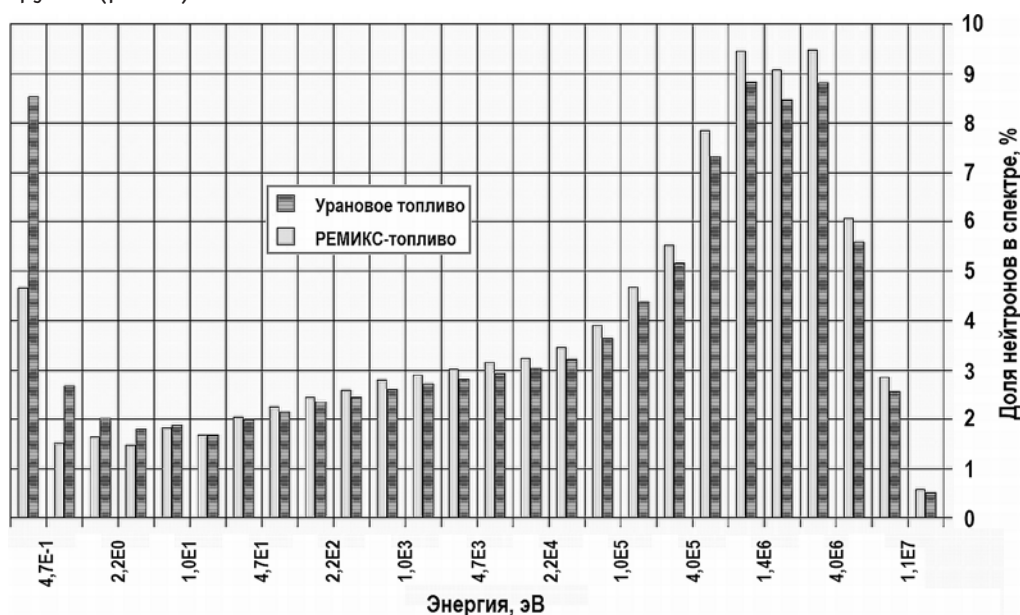


Рис. 8. Спектры нейтронов для ТВС с обогащением 4,4%

Расчет топливного цикла с использованием РЕМИКС-топлива позволяет говорить о возможности применения полной загрузки активной зоны РЕМИКС-топливом, при условии увеличения обогащения карбида бора в пэлах и борной кислоты в теплоносителе по  $^{10}\text{B}$  для удовлетворения требованиям ядерной безопасности и соответствия параметрам активной зоны при использовании топлива на основе обогащенного урана [12, 13]. Применение такого топливного цикла позволит экономить около 30% урана [14], а также отказаться от хранения плутония, получаемого на реакторах типа ВВЭР. Расчет топливного цикла с использованием топлива на основе регенерированного урана показал возможность применения полной загрузки активной зоны регенерированным топливом. Применение топливного цикла на основе регенерированного урана не требует внесения изменений в пэлы СУЗ и в водно-химический режим теплоносителя, поскольку слабо сказывается на нейтронно-физических параметрах активной зоны.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность вовлечения извлекаемого из реакторов на тепловых нейтронах отработавшего ядерного топлива в ядерный топливный цикл для аналогичных реакторов, в частности на реакторах ВВЭР-1000 (В-320). Рассмотренный топливный цикл подразумевает длительную (примерно 50 лет) работу установок в замкнутом цикле с многократным повторным использованием отработавшего топлива, поскольку в расчетах состав выгружаемого топлива принимался равновесным с наименее благоприятным изотопным составом плутония. Нейтронно-физические свойства активной зоны при



полной загрузке регенерированным топливом позволяют достичь длительности кампании загрузок с топливом на основе обогащенного урана. Расчеты коэффициентов реактивности показали, что применение рассматриваемых загрузок ведет к увеличению их абсолютных значений, следствием чего является увеличение температуры повторной критичности. На конец топливной кампании ее величина составляет 225°C. Помимо этого, более низкое значение максимального коэффициента неравномерности в течение кампании для плутониевого топлива позволяет говорить о том, что при использовании такого топлива можно сократить либо вообще отказаться от топливных элементов с гадолинием в случае увеличения содержания  $^{10}\text{В}$  в теплоносителе, поскольку изменение нейтронного спектра снижает их эффективность.

Применение топлива на основе регенерированного урана позволяет расширить топливную базу для реакторов типа ВВЭР и не требует внесения изменений в пэлы СУЗ и в водно-химический режим теплоносителя. Однако при использовании данного топлива проблема хранения и использования наработанного на реакторах типа ВВЭР плутония не решается.

Применение топливного цикла с регенерированным топливом на основе РЕМИКС-топлива позволяет максимально экономить природный уран, а также отказаться от хранения плутония, получаемого на реакторах типа ВВЭР в течение длительного времени. Так как при изготовлении РЕМИКС-топлива используется вся неразделенная смесь изотопов урана и плутония из отработавшего топлива, снижается риск несанкционированного распространения плутония. Однако применение 100% загрузки активной зоны РЕМИКС-топливом накладывает более жесткие требования для поглощающих элементов СУЗ вследствие общего ужесточения спектра нейтронов и требует применения раствора борной кислоты, обогащенного по изотопу  $^{10}\text{В}$  в теплоносителе.

Исследованные топливные циклы могут рассматриваться как переходные решения при переводе атомной энергетики на двухкомпонентную основу с применением как быстрых, так и тепловых реакторов для наиболее эффективной утилизации топливных ресурсов [5].

### Литература

1. Андрианова Е.А., Давиденко В.Д., Цибульский В.Ф. Перспективные топливные загрузки реакторов для замкнутого топливного цикла ядерной энергетики. // Атомная энергия. – 2015. – Т. 118. – Вып. 5. – С. 243-247. Электронный ресурс: <http://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/845> (дата доступа 22.02.2023).
2. Давиденко В.Д., Цибульский В.Ф. Эффективный способ сжигания энергетического плутония в ВВЭР. // Атомная энергия. – 2015. – Т. 118. – Вып. 3. – С. 134-136. Электронный ресурс: <http://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/820> (дата доступа 22.02.2023).
3. Grouiller J., Boucher L., Guillet J. et al. French strategies and scenarios for plutonium and long lived radionuclides management from the today PWR park towards GEN IV systems. / In: Proc. of the Global'2003. Atoms for Prosperity: Apdating Elsenh. Global Vision for Nuclear Energy. USA, Nov. 16-20 2003, pp. 130-134.
4. Федоров Ю.С., Бибичев Б.А., Зильберман Б.Я., Кудрявцев Е.Г. Использование регенерированного урана и плутония в тепловых реакторах. // Атомная энергия. – 2005. – Т. 99. – Вып. 2. – С. 136-141. Электронный ресурс: <http://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2440> (дата доступа 22.02.2023).
5. Адамов Е.О., Мочалов Ю.С., Рачков В.И., Хомяков Ю.С., Шадрин А.Ю., Кащеев В.А., Хаперская А.В. Переработка отработавшего ядерного топлива и рециклирование ядерных материалов в двухкомпонентной ядерной энергетике. // Атомная энергия. – 2021. – Т. 130. – Вып. 1. – С. 28-34. Электронный ресурс: <http://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/4260> (дата доступа 22.02.2023).
6. Семченков Ю.М. Использование топлива в реакторах ВВЭР: состояние и перспективы. // Росэнергоатом. – 2014. – № 11. – С. 8-13. Электронный ресурс: <http://nrcki.ru/>

files/pdf/1463658870.pdf (дата доступа 22.02.2023).

7. *Тебин В.В., Обухов В.В., Сергеев В.К., Иванов А.С.* Проект пакета программ САПФИР для решения задач расчета ячейки реактора. // ВАНТ. Серия: Физика и техника ядерных реакторов. – 1985. – Вып. 4. – С. 68-71.

8. *Карпов А.С., Тебин В.В.* Система подготовки многогрупповых констант для делящихся материалов на основе оцененных ядерных данных пакета САПФИР. / Материалы X симпозиума по проблемам физики реакторов «Волга-97», 2-6 сентября 1997. – Москва, 1997, 191 с.

9. *Кавун О.Ю.* Методика моделирования динамики энергоблока АЭС, реализованная в программном комплексе РАДУГА-ЭУ. // ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов. – 1999. – Вып. 2. – С. 17-39.

10. *Семишин В.В., Кавун О.Ю.* Исследование возможности замыкания топливного цикла для реактора ВВЭР-1000. / Тез. докл. научно-техн. конф. «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики» 27-29 ноября 2019 г. – Обнинск: ГНЦ РФ – ФЭИ, 2019, 108 с. ISBN 978-5-907108-18-9.

11. *Проселков В.Н., Алешин С.С., Попов С.Г., Сидоренко В.Д., Славягин П.Д., Татауров А.Л., Милованов О.В., Михеев Е.Н., Ананьев Ю.А., Пыткин Ю.Н., Пименов Ю.В.* Анализ возможности использования топлива на основе регенерата урана в ВВЭР. // Атомная энергия. – 2003. – Т. 95. – Вып. 6. – С. 422-428. Электронный ресурс: <http://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/3575> (дата доступа 22.02.2023).

12. *Павловичев А.М., Павлов В.И., Семченков Ю.М., Кудрявцев Е.Г., Федоров Ю.С., Бибичев Б.А.* Нейтронно-физические характеристики активной зоны ВВЭР-1000 со 100%-ной загрузкой топливом из регенерированного урана и плутония. // Атомная энергия. – 2006. – Т. 101. – Вып. 6. – С. 407-413. Электронный ресурс: <http://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1941> (дата доступа 22.02.2023).

13. *Павловичев А.М., Павлов В.И., Семченков Ю.М., Кудрявцев Е.Г., Федоров Ю.С., Бибичев Б.А., Зильберман Б.Я.* Нейтронно-физические характеристики активной зоны ВВЭР-1000 со 100%-ной загрузкой топливом из смеси регенерированного урана, плутония и обогащенного урана. // Атомная энергия. – 2008. – Т. 104. – Вып. 4. – С. 195-197. Электронный ресурс <http://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1772> (дата доступа 22.02.2023).

14. *Бобров Е.А.* Исследование характеристик замыкания топливного цикла реакторов ВВЭР на основе РЕМИКС-технологии. – Дисс. канд. техн. наук. – М.: НИЦ «КИ», 2016. – 129 стр. Электронный ресурс: <https://www.dissercat.com/content/issledovanie-kharakteristik-zamykaniya-toplivnogo-tsikla-reaktorov-vver-na-osnove-remiks-tek> (дата доступа 22.02.2023).

Поступила в редакцию 25.02.2023 г.

#### Автор

Семишин Виктор Вадимович, ассистент  
E-mail: [semishin@bmstu.ru](mailto:semishin@bmstu.ru)

UDC 621.039.51

## Evaluation of Neutronic Performance for the VVER-1000 Reactor Core with Regenerated Uranium-Plutonium Fuel

Semishin V.V.

Bauman Moscow State Technical University  
5/1 2nd Baumanskaya Str., 105005 Moscow, Russia

#### ABSTRACT

The possibility has been considered for the VVER-1000 reactor fuel column to

be formed based on regenerated fuel with the use of the spent fuel accumulated in reactors of the same type. A study was undertaken to investigate the change in the isotopic composition of the plutonium discharged from a thermal reactor in the course of its multiple reprocessing and recycle in a thermal neutron reactor. To obtain an equilibrium isotopic composition of the reactor-grade plutonium, 3D neutronic calculations were performed for the stationary fuel cycles of a VVER-1000 serial reactor with conventional oxide fuel and oxide fuel based on regenerated uranium and based on an undivided mixture of uranium and plutonium oxides from SNF. The neutronic performance of reactor cores was compared for the above fuel types in the course of fuel lifetime, including the following: in-core radial power density shaping, values of reactivity coefficients for various thermal parameters, reactivity control system efficiency, etc.

**Key words:** neutronic calculation, reactor core, VVER, REMIX fuel, SAPPHIRE, DESNA, closed nuclear fuel cycle, plutonium, uranium regenerate.

Semishin V.V. Evaluation of Neutronic Performance for the VVER-1000 Reactor Core with Regenerated Uranium-Plutonium Fuel. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023, no. 2, pp. 15-26; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.2.02> (in Russian).

#### REFERENCES

1. Andrianova E.A., Davidenko V.D., Tsibul'skii V.F. Prospective Fuel Loads of Reactors in a Closed Fuel Cycle of Nuclear Power. *Atomic Energy*. 2015, v. 118, iss. 5, pp. 301-306; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-015-9997-2>.
2. Davidenko V.D., Tsibul'skii S.V. Effective Method of Burning Power-Grade Plutonium in VVER. *Atomic Energy*. 2015, v. 118, iss. 3, pp. 170-173; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-015-9973-x>.
3. Grouiller J., Boucher L., Guillet J. et al. French Strategies and Scenarios for Plutonium and Long Lived Radionuclides Management from the Today PWR Park Towards GEN IV Systems. In: *Proc. of Global'2003. Atoms for Prosperity: Apdating Elsenh. Global Vision for Nuclear Energy*. USA, Nov. 16-20 2003, pp. 130 - 134.
4. Fedorov Yu.S., Bibichev B.A., Zil'berman B.Ya., Kudryavtsev E.G. Use of Recovered Uranium and Plutonium in Thermal Reactors. *Atomic Energy*. 2005, v. 99, iss. 2, pp. 572-576; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-005-0248-9>.
5. Adamov E.O., Mochalov Y.S., Rachkov V.I., Khomyakov Yu.S., Shadrin A.Yu., Kascheev V.A., Khaperskaya A.V. Spent Nuclear Fuel Reprocessing and Nuclear Materials Recycling in Two-Component Nuclear Energy. *Atomic Energy*. 2021, v. 130, iss. 1, pp. 29-35; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00769-w>.
6. Semchenkov Yu.M. Fuel Use in VVER Reactors: State and Prospects. *Rosenergoatom*, 2014, no. 11, pp. 8-13. Available at: <http://nrcki.ru/files/pdf/1463658870.pdf> (accessed Feb. 22, 2023) (in Russian).
7. Tebin V.V., Obuhov V.V., Sergeev V.K., Ivanov A.S. The Project of the SAPPHIRE Software Package for Solving the Problems of Calculating the Reactor Cell. *VANT. Ser. Fizika i Tekhnika Yadernykh Reaktorov*. 1985, v. 111, iss. 4, pp. 68-71 (in Russian).
8. Karpov A.S., Tebin V.V. A system for Preparing Multigroup Constants for Fissile Materials Based on the Estimated Nuclear Data of the SAPPHIRE Package. *Proc. of the X-th Symp. on Nuclear Reactors Physics Problems «Volga-97»*, Sep. 2-6, 1997. Moscow, 1997, 191 p. (in Russian).
9. Kavun O.Yu. The Method of Modeling the Dynamics of the NPP Power Unit Implemented in the RADUGA-EU Software Package. *VANT. Ser. Fizika Yadernykh Reaktorov*. 1999, iss. 2, pp. 17-39 (in Russian).
10. Semishin V.V., Kavun O.Yu. Investigation of the Possibility of Closing the Fuel Cycle for the VVER-1000 Reactor. *Proc. of the XXX-th Sci.-Techn. Conf. «Neutron-Physical Problems of Nuclear Power Engineering»*, Nov. 27-29, 2019. Obninsk. IPPE JSC Publ.,

2019, 108 p. ISBN 978-5-907108-18-9 (in Russian).

11. Proselkov V.N., Aleshin S.S., Popov S.G., Sidorenko V.D., Slavyagin P.D., Tataurov A.L., Milovanov O.V., Mikheev E.N., Anan'ev Yu.A., Pytkin Yu.N., Pimenov Yu.V. Analysis of the Possibility of Using Fuel Based on Reclaimed Uranium in VVER Reactors. *Atomic Energy*. 2003, v. 95, iss. 6, pp. 829-834; DOI: <https://doi.org/10.1023/B:ATEN.0000018995.09337.b5>.

12. 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, iss. 6, pp. 863-868; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-006-0182-5>.

13. 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, iss. 4, pp. 257-261; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-008-9025-x>.

14. Bobrov E.A. *Investigation of the Characteristics of the Fuel Cycle Closure of VVER Reactors Based on Remix Technology*. Cand. Sci. (Engineering) Diss. Moscow. NRCentre «Kurchatov Institute» Publ., 2016, 129 p. Available at: <https://www.dissercat.com/content/issledovanie-kharakteristik-zamykaniya-toplivnogo-tsikla-reaktorov-vver-na-osnove-remiks-tek> (accessed Feb. 22, 2023) (in Russian).

#### Author

Viktor V. Semishin, Assistant

E-mail: [semishin@bmstu.ru](mailto:semishin@bmstu.ru)