

УДК: 621.039.746, 621.039.566

АНАЛИЗ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ВЫСОТНОЙ ГЛУБИНЫ ВЫГОРАНИЯ ТОПЛИВА В СБОРКАХ ВВЭР-1000 ПРИ РАБОТЕ НА НИЗКИХ УРОВНЯХ МОЩНОСТИ

Соболев А. В. (Sobolev_Artem@mail.ru),
 Каражелевская Ю. Е. (karazhielievskaja@mail.ru)
 (Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ),
 Зубков А. А. (zubkov@mail.ru)
 (АО «Инженерный центр ядерных контейнеров»)

Рассматривается проблема обращения с ОТВС, а именно вопросы неравномерности глубины выгорания кассет, использованных при пуске реактора. Указаны предпосылки к выполнению представленной работы. Так, основным стимулом послужила задача расчетного анализа радиационной безопасности контейнера для транспортирования ОТВС, использованных при пуске реактора.

► **Ключевые слова:** *неравномерность глубины выгорания, пусковые режимы, ТВС, влияние органов регулирования СУЗ.*

DOI: 10.26277/SECNRS.2019.92.2.002

ANALYSIS AXIAL FUEL BURNUP IRREGULARITY TO VVER-1000 ASSEMBLIES ON LOW POWER LEVELS OPERATING

Sobolev A. V., Karazhelevskaya Yu. E.
 (Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering,
 National Research Nuclear University «MEPhI»),
 Zubkov A. A. (JSC «Engineering Center of Nuclear Containers»)

The paper addresses the problem of handling of spent fuel assembly (SFA), namely the issues of uneven fuel assembly burnup used during the beginning of core life. The article briefly indicates the prerequisites for the performance of the submitted work. The main incentive was the task of calculating the radiation safety of the container for transporting the SFA used during the beginning of core life.

► **Keywords:** *fuel burnup uneven, startup modes in beginning of core life, fuel assembly, control rods influence.*

DOI: 10.26277/SECNRS.2019.92.2.002

Существующая сегодня концепция обеспечения безопасности объектов использования атомной энергии предполагает, в том числе, обеспечение безопасности на всех этапах жизненного цикла данных объектов и на всех технологических этапах конкретного предприятия. В частности, для атомных станций одним из этапов технологии является обращение с отработавшим ядерным топливом. Так, после использования и предварительной выдержки отработавшие топливные кассеты загружаются в транспортные упаковки и отправляются в хранилища с последующей переработкой.

Операции по загрузке, разгрузке, перемещению отработавшей тепловыделяющей сборки (ОТВС), как и самой транспортной упаковки, должны удовлетворять требованиям безопасности, включающим требования ядерной, радиационной, пожарной, производственной безопасности. При этом наиболее критичными являются требования ядерной и радиационной безопасности. Однако при всей важности выполнения обозначенных требований есть существенные проблемы при их подтверждении, в особенности расчетными методами. Так, например, интенсивность источника нейтронов ОТВС, который часто определяет радиационную обстановку вне упаковки, согласно РБ-093-14 [1], определяется с погрешностью порядка 20 %. Определить источник нейтронов можно только для табулированного набора конфигураций ОТВС, определяемых начальным обогащением и средней глубиной выгорания. Такая огромная погрешность определения источника нейтронов вынуждает закладывать в конструкцию упаковки избыточные консервативные решения, что негативно сказывается на конкурентоспособности как самих упаковок, так и технологических процессов обращения с ними. Это тем более важно, когда ведется активная политика экспортной ориентации развития отечественной ядерной индустрии.

Другой важной характеристикой ОТВС является профиль неравномерности глубины выгорания по высоте кассеты. Открытых источников сведений по данной характеристике для отечественных конструкций ОТВС практически нет [2]. Поэтому на практике часто используют либо данные иностранных источников для других сборок [3 – 5], либо принимают профиль и коэффициент неравномерности глубины выгорания идентичным профилю и неравномерности энерговыделения в кассете.

Оба подхода достаточно спорны. Если же рассматривать этап работы реакторной установки (РУ) на минимальных уровнях мощности, порядка 10 % от номинала, то здесь картина гораздо хуже. Тем не менее ОТВС, использованные при физическом пуске РУ, также подлежат транспортированию к месту хранения и переработки в упаковках, предназначенных для ОТВС, отработавших на энергетической мощности. При этом возможное для пусковых кассет смещение профиля глубины выгорания по высоте может существенно изменить как радиационную обстановку вне транспортной упаковки, так и величину коэффициента неравномерности. Именно эти вопросы рассмотрены в данной работе.

Смещение или изменение профиля неравномерности глубины выгорания возможно при длительной работе РУ в масштабе длительности кампании топлива на низких уровнях мощности (здесь и далее под низким уровнем мощности подразумевается работа на мощности до 10 % от номинальной). С точки зрения физики реактора, при «задавливании» мощности стержнями системы управления и защиты (СУЗ), в кассетах с поглощающими стержнями и смежных профилей неравномерности энерговыделения по высоте будет меняться со смещением максимума вниз. Коэффициент неравномерности глубины выгорания по высоте будет меняться как при управлении за счет введения борной кислоты в теплоноситель, так и в случае управления стержнями СУЗ. Как на самом деле производится регулирование мощности при физическом пуске, какова длительность данного этапа и прочее определяется в каждом конкретном случае индивидуальной программой пуска. Поэтому вопрос насколько адекватно регулирование мощности одним или другим способом на практике в рамках работы не обсуждается. Очевидно, что в действительности реализуется некоторый комбинированный вариант. Поэтому целесообразно рассмотреть два указанных крайних варианта работы РУ на низком уровне мощности, а именно: удержание мощности стержнями СУЗ и удержание мощности борной кислотой. Получив качественные и количественные оценки для каждого из этих способов удержания мощности, можно на основе сравнительного анализа выбрать наиболее пессимистичный режим управления мощностью и использовать его для дальнейшего анализа радиационной безопасности при обращении с ОТВС и транспортными упаковками.

Ответы на поставленные вопросы получены с помощью расчетов в ПК «SERPENT» [6] для ТВС ВВЭР-1000. «SERPENT» реализует расчеты методом Монте-Карло с использованием многогруппового представления констант. Расчеты выполнены для гетерогенных моделей топливных сборок с начальным обогащением по ^{235}U $x = 4,4\%$. В рамках расчетов для упрощения по боковым границам тепловыделяющей сборки (ТВС) заданы условия полного отражения. Топливная часть ТВЭЛ разбита по высоте на 20 участков, что позволяет получить расчетную оценку глубины выгорания на каждом участке. Расчеты выполнены для длительности работы на низком уровне мощности 90, 180 и 360 суток. Мощность задана величиной, соответствующей 10 % от номинальной.

Регулирование мощности стержнями СУЗ

Выполнены расчеты для набора моделей, отличающихся положением стержней регулирования в соответствующих каналах ТВС. Так, рассматривались модели, когда стержень СУЗ опущен на: 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20 и 10 %. Результаты расчетов неравномерности глубины выгорания для указанных моделей при длительности топливной кампании 180 суток приводятся на рис. 1. Результаты для

рассматриваемых длительностей топливных кампаний приводятся в таблице 1.

Из результатов расчетов следует, что профиль неравномерности глубины выгорания существенно зависит от положения стержня СУЗ. Пик неравномерности реализуется сразу за участком, где оканчивается стержень регулирования.

Коэффициент неравномерности глубины выгорания, нормированный на среднюю величину, достигает максимума для положения стержня регулирования, погруженного на 80 %.

Увеличение длительности этапа работы на низких уровнях мощности приводит к уменьшению неравномерности глубины выгорания, что вполне укладывается в современные представления физики реактора.

Полученные результаты указывают, что для обращения с ОТВС и транспортными упаковками для них, отработавшими значительную часть времени на низком уровне мощности, необходим отдельный, самостоятельный анализ радиационной безопасности на каждом технологическом этапе или операции. Дело здесь в том, что такие сборки могут иметь значительно большие коэффициенты неравномерности глубины выгорания по высоте и совершенно другой профиль неравномерности по высоте в сравнении с кассетами, отработавшими кампанию на энергетических уровнях мощности.

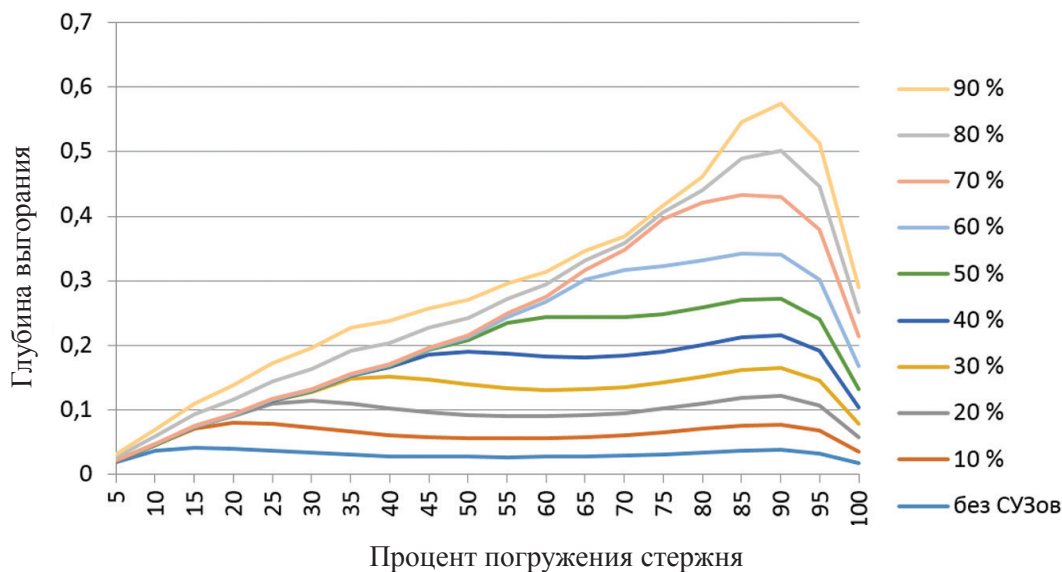


Рис. 1. Расчетная неравномерность глубины выгорания ОТВС со стержнями СУЗ для длительности работы на минимальном уровне мощности 180 суток



Таблица 1

Расчетные профили неравномерности глубины выгорания по высоте пусковых ОТВС ВВЭР-1000

Глубина выгорания по участкам, %	Стержни СУЗ погружены на 90 %		Стержни СУЗ погружены на 80 %		Стержни СУЗ погружены на 70 %		Стержни СУЗ погружены на 60 %		Стержни СУЗ погружены на 50 %							
	Длительность работы, суток	90	180	360	90	180	360	90	180	360	90	180	360	90	180	360
1 (верх)																
5	5,99E-06	4,48E-03	4,76E-03	4,93E-03	5,13E-06	4,63E-03	4,93E-03	5,17E-06	2,09E-04	1,84E-02	4,73E-06	5,46E-05	1,80E-02	1,06E-07	2,80E-05	9,43E-04
10	1,28E-05	1,12E-02	1,16E-02	1,14E-02	7,49E-06	1,14E-02	1,20E-02	5,75E-06	5,24E-04	4,07E-02	4,82E-06	1,20E-04	4,03E-02	4,36E-06	6,44E-05	2,28E-03
15	1,49E-05	1,72E-02	1,77E-02	1,73E-02	1,49E-05	1,73E-02	1,79E-02	6,93E-06	8,08E-04	5,53E-02	6,51E-06	1,94E-04	5,57E-02	5,17E-06	9,79E-05	3,36E-03
20	1,74E-05	2,27E-02	2,32E-02	2,27E-02	1,40E-05	2,27E-02	2,32E-02	5,80E-06	1,04E-03	6,39E-02	6,30E-06	2,72E-04	6,56E-02	5,73E-06	1,45E-04	4,37E-03
25	1,62E-05	2,76E-02	2,80E-02	2,74E-02	1,51E-05	2,74E-02	2,78E-02	6,93E-06	1,29E-03	6,89E-02	6,57E-06	3,58E-04	7,01E-02	6,97E-06	2,26E-04	5,10E-03
30	1,56E-05	3,20E-02	3,23E-02	3,17E-02	1,60E-05	3,17E-02	3,20E-02	6,37E-06	1,59E-03	7,13E-02	6,10E-06	4,54E-04	7,09E-02	1,51E-05	4,47E-04	5,77E-03
35	1,65E-05	3,55E-02	3,58E-02	3,52E-02	1,60E-05	3,52E-02	3,55E-02	8,11E-06	1,91E-03	7,10E-02	7,98E-06	6,38E-04	6,85E-02	4,87E-05	1,01E-03	6,80E-03
40	1,59E-05	3,35E-02	3,38E-02	3,32E-02	1,68E-05	3,32E-02	3,36E-02	8,45E-06	2,08E-03	6,14E-02	2,08E-05	9,36E-04	5,64E-02	1,92E-04	2,32E-03	8,23E-03
45	1,94E-05	3,06E-02	3,11E-02	3,06E-02	1,70E-05	3,06E-02	3,11E-02	1,76E-05	2,50E-03	5,03E-02	6,48E-05	1,73E-03	4,25E-02	7,90E-04	6,17E-03	1,35E-02
50	2,29E-05	2,73E-02	2,83E-02	2,71E-02	2,19E-05	2,71E-02	2,81E-02	3,97E-05	3,26E-03	3,87E-02	2,80E-04	3,80E-03	3,00E-02	3,59E-03	1,81E-02	2,98E-02
55	3,20E-05	2,34E-02	2,55E-02	2,35E-02	3,37E-05	2,35E-02	2,56E-02	1,24E-04	4,77E-03	2,81E-02	1,21E-03	8,92E-03	2,34E-02	1,52E-02	4,89E-02	7,03E-02
60	8,97E-05	1,91E-02	2,38E-02	1,94E-02	8,16E-05	1,94E-02	2,40E-02	4,96E-04	7,95E-03	2,14E-02	5,35E-03	2,33E-02	3,12E-02	2,58E-02	6,14E-02	8,72E-02
65	3,02E-04	1,44E-02	2,47E-02	1,48E-02	2,94E-04	1,48E-02	2,48E-02	2,06E-03	1,47E-02	2,12E-02	2,18E-02	5,89E-02	6,64E-02	3,33E-02	6,24E-02	9,26E-02
70	1,11E-03	1,05E-02	3,13E-02	1,09E-02	1,14E-03	1,09E-02	3,08E-02	8,85E-03	3,18E-02	3,46E-02	3,52E-02	7,25E-02	7,87E-02	3,79E-02	6,02E-02	9,69E-02
75	4,46E-03	1,02E-02	4,63E-02	1,03E-02	4,49E-03	1,03E-02	4,57E-02	3,30E-02	7,29E-02	7,48E-02	4,35E-02	7,42E-02	7,93E-02	4,01E-02	5,86E-02	1,03E-01
80	1,74E-02	2,05E-02	7,58E-02	2,05E-02	1,74E-02	2,05E-02	7,57E-02	4,97E-02	8,85E-02	8,98E-02	4,70E-02	7,28E-02	7,76E-02	3,96E-02	5,80E-02	1,11E-01
85	5,43E-02	5,70E-02	1,45E-01	5,69E-02	5,44E-02	5,69E-02	1,45E-01	5,65E-02	9,08E-02	9,18E-02	4,60E-02	7,12E-02	7,62E-02	3,65E-02	5,79E-02	1,18E-01
90	7,08E-02	7,28E-02	1,72E-01	7,28E-02	7,09E-02	7,28E-02	1,73E-01	5,46E-02	8,81E-02	8,89E-02	4,06E-02	6,86E-02	7,40E-02	3,06E-02	5,66E-02	1,23E-01
95	6,59E-02	6,75E-02	1,65E-01	6,73E-02	6,58E-02	6,73E-02	1,65E-01	4,36E-02	7,78E-02	7,86E-02	2,99E-02	6,00E-02	6,57E-02	2,16E-02	5,00E-02	1,16E-01
100 (низ)	3,72E-02	3,82E-02	1,06E-01	3,81E-02	3,71E-02	3,81E-02	1,06E-01	5,17E-06	2,09E-04	1,84E-02	1,34E-02	3,47E-02	3,89E-02	9,28E-03	2,84E-02	7,44E-02
Коэффициент неравномерности глубины выгорания	5,62	2,53	3,25	2,53	5,63	2,53	3,26	4,18	3,37	1,64	3,31	2,68	1,41	2,72	2,19	2,29

Анализ результатов расчетов показывает, что для сборок смежных с кассетами, в которых расположены стержни регулирования, профиль неравномерности глубины выгорания будет более плавный, соответственно, и коэффициент неравномерности глубины выгорания по высоте будет меньше.

Регулирование мощности раствором борной кислоты в теплоносителе

Выполнены расчеты для набора моделей, отличающихся концентрацией борной кислоты в теплоносителе. Так, рассматривались модели с концентрацией H_3BO_3 : 2, 4, 8, 12 и 16 г/кг. Результаты расчетов неравномерности глубины выгорания для указанных моделей при длительности топливной кампании 180 суток приводятся на рис. 2. Результаты для рассматриваемых длительностей топливных кампаний приводятся в таблице 2.

Из результатов расчетов следует, что профиль неравномерности глубины выгорания несущественно зависит от концентрации жидкого борного поглотителя в теплоносителе. Пик неравномерно-

сти реализуется по центру.

Наибольшая величина коэффициента неравномерности глубины выгорания, нормированного на среднюю величину, составляет 1,49. Другими словами, введение жидкого борного поглотителя в теплоноситель приводит к выравниванию неравномерности глубины выгорания по высоте.

Увеличение длительности этапа работы на низких уровнях мощности, как и в случае регулирования стержнями СУЗ, приводит к снижению неравномерности глубины выгорания.

Заключение

Результаты выполненных исследований показывают, что при работе РУ на низком уровне мощности (порядка 10 % от номинальной) возможны существенные изменения как профиля неравномерности глубины выгорания по высоте, так и коэффициента неравномерности глубины выгорания по высоте. Особенно значительное изменение, в сравнении с ТВС, отработавшими на энергетических уровнях мощности, реализуется при регулировании мощности стержнями СУЗ в сборках, где располагаются стержни управления.

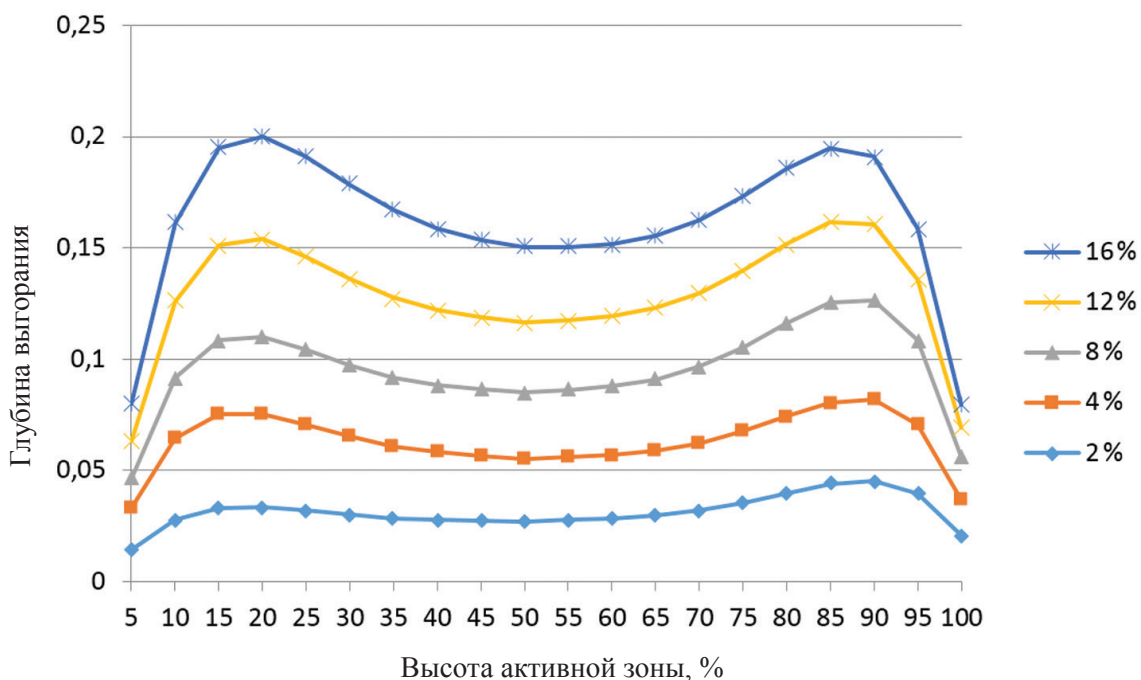


Рис. 2. Расчетная неравномерность глубины выгорания ОТВС для длительности работы на минимальном уровне мощности 180 суток

Таблица 2

Расчетные профили неравномерности глубины выгорания по высоте ОТВС ВВЭР-1000 при работе на малой мощности и регулировании концентрацией борной кислоты

Глубина выгорания по участкам, %	Концентрация H_3BO_3 2 г/кг			Концентрация H_3BO_3 4 г/кг			Концентрация H_3BO_3 8 г/кг			Концентрация H_3BO_3 12 г/кг			Концентрация H_3BO_3 16 г/кг		
	Длительность работы, суток			Длительность работы, суток			Длительность работы, суток			Длительность работы, суток			Длительность работы, суток		
	90	180	360	90	180	360	90	180	360	90	180	360	90	180	360
5	2,88E-03	1,43E-02	2,00E-02	2,89E-03	1,88E-02	2,06E-02	3,02E-03	1,33E-02	2,25E-02	3,03E-03	1,69E-02	1,96E-02	2,86E-03	1,67E-02	1,84E-02
10	7,10E-03	2,81E-02	3,88E-02	7,27E-03	3,63E-02	3,99E-02	7,50E-03	2,72E-02	4,42E-02	7,43E-03	3,45E-02	3,98E-02	7,18E-03	3,52E-02	3,83E-02
15	1,09E-02	3,32E-02	4,76E-02	1,12E-02	4,22E-02	4,74E-02	1,14E-02	3,33E-02	5,52E-02	1,14E-02	4,23E-02	4,95E-02	1,10E-02	4,41E-02	4,84E-02
20	1,43E-02	3,35E-02	5,27E-02	1,45E-02	4,18E-02	5,00E-02	1,49E-02	3,47E-02	6,17E-02	1,49E-02	4,39E-02	5,38E-02	1,46E-02	4,63E-02	5,23E-02
25	1,72E-02	3,20E-02	5,85E-02	1,73E-02	3,88E-02	5,19E-02	1,77E-02	3,36E-02	6,68E-02	1,77E-02	4,20E-02	5,63E-02	1,78E-02	4,49E-02	5,36E-02
30	1,96E-02	3,01E-02	6,56E-02	1,95E-02	3,52E-02	5,57E-02	2,02E-02	3,22E-02	7,21E-02	2,00E-02	3,87E-02	5,98E-02	2,06E-02	4,24E-02	5,48E-02
35	2,15E-02	2,86E-02	7,36E-02	2,13E-02	3,23E-02	6,25E-02	2,23E-02	3,10E-02	7,80E-02	2,17E-02	3,57E-02	6,51E-02	2,27E-02	3,95E-02	5,70E-02
40	2,29E-02	2,78E-02	8,07E-02	2,27E-02	3,04E-02	7,11E-02	2,38E-02	3,02E-02	8,34E-02	2,32E-02	3,36E-02	7,16E-02	2,41E-02	3,69E-02	6,10E-02
45	2,38E-02	2,76E-02	8,54E-02	2,35E-02	2,90E-02	7,95E-02	2,46E-02	2,98E-02	8,62E-02	2,45E-02	3,23E-02	7,81E-02	2,52E-02	3,51E-02	6,64E-02
50	2,33E-02	2,69E-02	8,41E-02	2,39E-02	2,84E-02	8,51E-02	2,51E-02	2,98E-02	8,54E-02	2,51E-02	3,15E-02	8,30E-02	2,59E-02	3,38E-02	7,21E-02
55	2,40E-02	2,78E-02	8,18E-02	2,40E-02	2,82E-02	8,71E-02	2,50E-02	3,01E-02	8,16E-02	2,53E-02	3,13E-02	8,53E-02	2,60E-02	3,30E-02	7,69E-02
60	2,35E-02	2,85E-02	7,44E-02	2,36E-02	2,85E-02	8,54E-02	2,44E-02	3,08E-02	7,52E-02	2,50E-02	3,14E-02	8,52E-02	2,55E-02	3,26E-02	8,05E-02
65	2,24E-02	2,98E-02	6,54E-02	2,27E-02	2,90E-02	7,99E-02	2,32E-02	3,22E-02	6,71E-02	2,41E-02	3,20E-02	8,26E-02	2,45E-02	3,27E-02	8,29E-02
70	2,06E-02	3,20E-02	5,70E-02	2,14E-02	3,02E-02	7,22E-02	2,15E-02	3,46E-02	5,96E-02	2,29E-02	3,31E-02	7,84E-02	2,29E-02	3,29E-02	8,41E-02
75	1,88E-02	3,56E-02	5,14E-02	1,97E-02	3,21E-02	6,43E-02	1,93E-02	3,78E-02	5,46E-02	2,11E-02	3,43E-02	7,30E-02	2,10E-02	3,34E-02	8,43E-02
80	1,65E-02	3,99E-02	4,91E-02	1,74E-02	3,44E-02	5,76E-02	1,69E-02	4,17E-02	5,25E-02	1,86E-02	3,57E-02	6,79E-02	1,87E-02	3,38E-02	8,34E-02
85	1,38E-02	4,40E-02	4,90E-02	1,46E-02	3,65E-02	5,29E-02	1,42E-02	4,48E-02	5,16E-02	1,54E-02	3,64E-02	6,33E-02	1,57E-02	3,31E-02	8,05E-02
90	1,07E-02	4,52E-02	4,81E-02	1,12E-02	3,66E-02	4,81E-02	1,10E-02	4,47E-02	4,92E-02	1,15E-02	3,45E-02	5,68E-02	1,22E-02	3,01E-02	7,40E-02
95	7,00E-03	3,96E-02	4,14E-02	7,20E-03	3,11E-02	3,94E-02	7,25E-03	3,77E-02	4,08E-02	7,40E-03	2,75E-02	4,52E-02	7,97E-03	2,30E-02	5,93E-02
100 (низ)	2,84E-03	2,10E-02	2,18E-02	2,89E-03	1,59E-02	2,03E-02	3,01E-03	1,90E-02	2,07E-02	2,93E-03	1,31E-02	2,27E-02	3,26E-03	1,06E-02	2,99E-02
Коэффициент неравномерности глубины выгорания	1,49	1,45	1,49	1,46	1,33	1,49	1,49	1,38	1,43	1,48	1,33	1,38	1,49	1,38	1,34

Регулирование с помощью введения в теплоноситель жидкого борного поглотителя практически не меняет профиль неравномерности глубины выгорания по высоте ТВС. Жидкий поглотитель приводит к выравниванию неравномерности и, как следствие, к уменьшению коэффициента неравномерности глубины выгорания по высоте.

Для всех вариантов реализации управления увеличение длительности работы на низком уровне мощности приводит к снижению неравномерности

глубины выгорания по высоте.

Полученные результаты особенно необходимы для операций обращения с ОТВС и упаковками для их перемещения и транспортирования. Изменение коэффициента неравномерности глубины выгорания ТВС и профиля неравномерности глубины выгорания может существенно изменить радиационную обстановку вокруг оборудования и упаковок, занятых в обращении с отработанными ТВС, и привести к переоблучению персонала и населения.

Список литературы

1. Радиационные и теплофизические характеристики отработавшего ядерного топлива водо-водяных энергетических реакторов и реакторов большой мощности канальных. РБ-093-14. – М.: Ростехнадзор, 2014.
2. Обоснование достоверности (точности) результатов при измерениях выгорания ядерного топлива ОТВС ВВЭР-1000 в реальных условиях приреакторного БВ Калининской АЭС с помощью установки МКС-01 ВВЭР: отчет о НИР / НПО «КВАНТ»; исполн. : Николаев С. А., Чернов В. А., Волков В. С., Ибрагимов Р. Л., Мастеров А. В., Яненко Ю. Е., Картуш С. Ф. – Обнинск, 2013. – Инв. № 01ОТ/К114.
3. Wagner J. C., DeHart M. D., Parks C. V. Recommendations for Addressing Axial Burnup in PWR Burnup Credit Analyses. NUREG/CR6801. ORNL. 2003.
4. Внуков В. С., Куликов В. И., Чукатели Л. И. Влияние аксиального распределения глубины выгорания ОТВС на значение $k_{эфф}$ контейнеров с отработавшим ядерным топливом // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2015. № 2.
5. Михайлов В. М., Мырцымова Л. А. Расчет кампании реактора ТВР-М с учетом неравномерности выгорания топлива: Препринт ИТЭФ. – М.: ЦНИИАтоминформ, 1986.
6. Jaakko Leppanen. SERPENT – A Continuous Energy Monte-Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code. – Helsinki: VTT Technical Research Centre of Finland, 2015.

References

1. Radiation and Thermophysical Characteristics of Spent Nuclear Fuel from Water-Cooled Water-Moderated Power Reactors and Large-Power Pressure Tube Reactors. RB-093-14. – М.: Rostechnadzor, 2014.
2. Validation of VVER-1000 SFA Burnup Measurements in Real Conditions in the Spent Nuclear Fuel Cooling Pool at Kalinin NPP Using VVER MKS-01 Facility: KVANT Report. Participants: S. A. Nikolayev, V. A. Chernov, V. S. Volkov, R. L. Ibragimov, A. V. Masterov, Yu. E. Yanenko, S. F. Kartush. – Obninsk, 2013. – Ref. № 01ОТ/К114.
3. J. C. Wagner, M. D. DeHart, C. V. Parks. Recommendations for Addressing Axial Burnup in PWR Burnup Credit Analyses. NUREG/CR6801. ORNL. 2003.
4. V. S. Vnukov, V. I. Kulikov, L. I. Chkuaseli. Effect of SFA Axial Burnup Distribution on k_{eff} of the Spent Nuclear Fuel Casks // University News. Nuclear Energy. 2015. № 2.
5. V. M. Mikhailov, L. A. Myrtsyomova. Calculation of TVR-M Fuel Cycle Considering Non-Uniform Burnup: ITEF Preprint. – М.: ЦНИИАтоминформ, 1986.
6. Jaakko Leppanen. SERPENT – A Continuous Energy Monte-Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code. – Helsinki: VTT Technical Research Centre of Finland, 2015.

