

## Некоторые характеристики топлива с обогащением выше 5 % гипотетической кассеты ТВСА реактора ВВЭР-1000

На основании конструктивных параметров и материалов топливных кассет ТВСА производства АО «ТВЭЛ», Россия, которые широко используются в настоящее время на АЭС Украины, проведено сравнение штатных ТВСА со средним обогащением 4,386 % и гипотетических ТВСА с обогащением 10 %. Показано, что внедрение новых ТВС приводит к улучшению использования топлива и повышению коэффициента использования установленной мощности. В то же время для выполнения существующих критериев ядерной безопасности потребуются, скорее всего, модернизация систем обращения со свежим и отработавшим топливом. Проанализирована возможность возникновения критичности на разных стадиях развития тяжелых аварий, связанных с плавлением активной зоны, при использовании топлива повышенного обогащения.

**Ключевые слова:** обогащение топлива, ядерная безопасность, коэффициент размножения нейтронов, плавление активной зоны.

**Є. І. Білодід, Ю. П. Ковбасенко**

### Деякі характеристики палива із збагаченням вище, ніж 5 %, гіпотетичної касети ТВЗА реактора ВВЕР-1000

За конструкційними параметрами та матеріалами паливних касет ТВЗА виробництва АО «ТВЭЛ», Росія, які широко використовуються на АЕС України, проведено порівняння штатних ТВЗА із середнім збагаченням 4,386 % і гіпотетичних ТВЗА із збагаченням 10 %. Показано, що впровадження нових ТВЗ сприяє поліпшенню показників використання палива та підвищенню коефіцієнта використання встановленої потужності. Водночас для виконання критеріїв ядерної безпеки виникне, скоріш за все, потреба в модернізації систем поводження із свіжим та відпрацьованим паливом. Проаналізовано можливість виникнення критичності на різних стадіях розвитку важких аварій, пов'язаних з розплавом активної зони в разі використання палива підвищеного збагачення.

**Ключові слова:** збагачення палива, ядерна безпека, коефіцієнт розмноження нейтронів, плавлення активної зони.

© Е. И. Белодед, Ю. П. Ковбасенко, 2016

С момента начала эксплуатации легководных реакторов (PWR, ВВЭР) наблюдается устойчивая тенденция к повышению начального обогащения ядерного топлива, формируемая, в основном, стремлением к снижению стоимости топливного цикла [1]. Стоимость топливного цикла снижается либо за счет удлинения кампании реактора с 12 до 18 и даже 24 месяцев, либо за счет снижения количества ежегодно перегружаемого топлива — 1/3, 1/4, 1/5 активной зоны.

В настоящее время начальное среднее обогащение топлива неуклонно приближается к 5 %, а допустимое среднее выгорание уже превысило 50 МВт·сут/кг U. На повестку дня выносятся переход в диапазон начальных обогащений 5—10 % с выгоранием до 100 МВт·сут/кг U. Наличие мощного экономического стимула делает данный процесс необратимым несмотря на то, что его сильно затормозила авария на АЭС «Фукусима», значительно ухудшив перспективы развития атомной энергетики в целом. Единственным препятствием на этом пути может стать возможное ухудшение безопасности атомных энергоблоков. Цель статьи — проанализировать некоторые вопросы безопасности, связанные с повышением начального обогащения топлива. (Публикация подготовлена по материалам доклада, представленного на конференции МАГАТЭ “Light Water Reactor Fuel Enrichment Beyond 5 % Limit: Perspectives and Challenges”, 12—16 октября 2015 г.)

**Программы и исходные данные.** Все расчетные результаты, представленные в статье, получены с помощью американского пакета программ SCALE, разработанного в Ок-Риджской Национальной лаборатории США по заказу Комиссии по ядерному регулированию США (US NRC). Разработка системы кодов была направлена на анализ критичности, радиационной безопасности, теплопередачи и выгорания. Начиная с первого выпуска SCALE в 1980 году, пакет применяется многими организациями во всем мире для моделирования систем обращения со свежим и отработавшим ядерным топливом (ОЯТ), в частности хранилищ ядерного топлива.

Для расчетов с помощью SCALE можно использовать девять библиотек нейтронно-физических констант, разработанных на основе файлов оцененных данных ENDF/B-IV, V, VI и VII. Из названных библиотек восемь (шесть из них созданы специально для анализа вопросов критичности) могут автоматически запрашиваться программой в ходе вычислений [2].

Пакет программ SCALE разработан и валидирован с целью расчета топливных систем реакторов типа PWR и BWR, но в последние годы широко используется также для моделирования систем обращения с топливом реакторов ВВЭР и РБМК [3].

Анализ проведен на основе кассеты ТВСА, которая в настоящее время является базовой для топливных загрузок значительной части реакторов ВВЭР-1000. Максимальное начальное среднее обогащение штатных ТВСА, используемых на АЭС Украины, составляет в настоящее время 4,386 %. Проведем сравнение некоторых параметров безопасности этих ТВС с гипотетическими ТВС, аналогичными по конструкции и материалам, но с начальным обогащением топлива 10 %.

Повышение размножающих свойств ТВС в начале кампании приводит к увеличению начальной концентрации борной кислоты в замедлителе, что, в свою очередь может привести к нежелательному изменению знаков некоторых

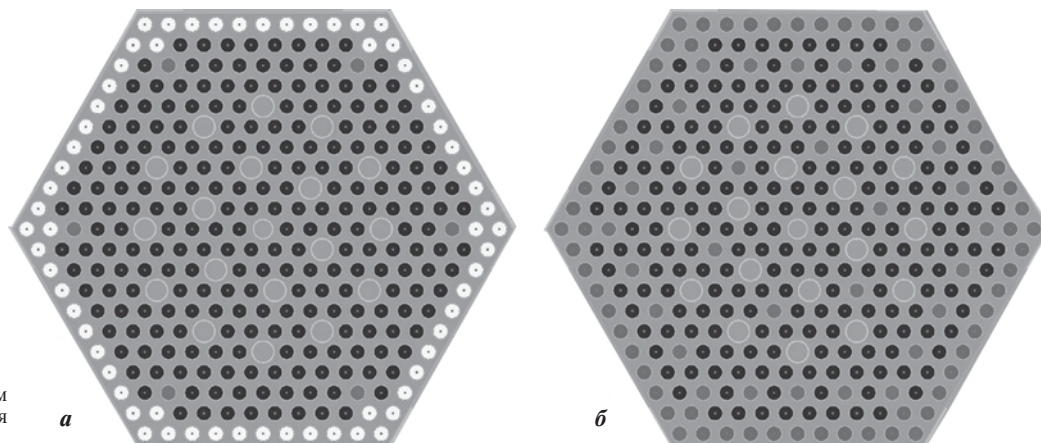


Рис. 1. Схема решетки твэлов + твэгов рассматриваемых ТВС: *a* – штатная ТВСА со средним обогащением 4,386 %; *б* – гипотетическая ТВСА с обогащением топлива 10 %

коэффициентов реактивности в начале кампании (в первую очередь, плотностного коэффициента реактивности). Для предотвращения этого явления в ТВСА с обогащением 10 % количество твэгов, содержащих 5 % масс. интегрированного в топливо выгорающего поглотителя  $Gd_2O_3$ , увеличено до 36 штук против шести в ТВСА с начальным обогащением 4,386 % (рис. 1). Это делает размножающие свойства обоих ТВС в свежем, невыгоревшем состоянии практически одинаковыми.

**Анализ размножающих свойств свежего топлива.** Количество твэгов в ТВСА с повышенным обогащением подобрано так, чтобы размножающие свойства свежих ТВС в неборированной воде плотностью 1 г/см<sup>3</sup> были практически одинаковыми:

$k_{eff} = 0,88161 \pm 0,00083$  — отдельно расположенная штатная ТВСА;

$k_{eff} = 0,88133 \pm 0,00085$  — отдельно расположенная ТВСА с обогащением 10 %.

Во многих странах (в том числе и в Украине) анализ безопасности рекомендуется проводить без учета выгорающих поглотителей и поглотителей, растворенных в воде. В этом случае возникает существенная разница в размножающих свойствах рассматриваемых типов ТВС:

$k_{eff} = 0,90597 \pm 0,00090$  — отдельно расположенная штатная ТВСА;

$k_{eff} = 1,00351 \pm 0,00086$  — отдельно расположенная ТВСА с обогащением 10 %.

Полученные результаты свидетельствуют о возможном возникновении трудностей при обосновании безопасности транспортирования свежих ТВС, поскольку, как известно, в большинстве стран в качестве критерия ядерной безопасности используется соотношение  $k_{eff} + \delta < 0,95$ , где  $\delta$  — сумма всех погрешностей (методической, систематической, статистической) определения коэффициента размножения нейтронов.

**Эксплуатация ТВС в активной зоне.** Рассмотрим реакторную ячейку, состоящую из центральной ТВС, окруженную со всех сторон половинками соседних ТВС (рис. 2). На границах ячейки задавались граничные условия зеркального отражения. Здесь и далее в расчетах учитывалась рабочая плотность воды в активной зоне ВВЭР-1000, равная приблизительно 0,72 г/см<sup>3</sup>, концентрация борной кислоты в теплоносителе — 3 г/кг. Изменение размножающих свойств ТВСА с различным начальным обогащением на номинальной мощности (3000 МВт/163 ТВС = 18,4 МВт/ТВС) в зависимости от продолжительности эксплуатации показано на рис. 3. Как видно из этого рисунка, начальные размножающие свойства рассматриваемых ТВС практически одинаковы. Продолжительность эксплуатации ТВСА с начальным обогащением 3,44 % составляет чуть больше 1000 эфф. сут (приблизительно 3 года). Эти ТВС характеризуются отсутствием в них твэгов, содержащих выгорающий поглотитель. Продолжительность эксплуатации ТВСА с начальным обогащением 4,386 %, содержащей шесть твэгов,

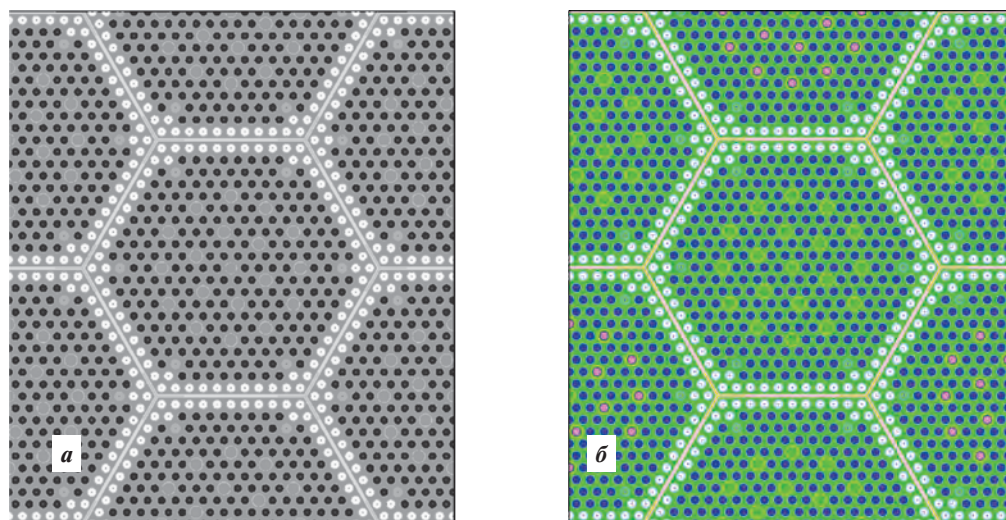


Рис. 2. Реакторная ячейка, используемая при моделировании параметров ТВС в активной зоне реактора: *a* — модель без стержней СУЗ; *б* — модель со стержнями СУЗ

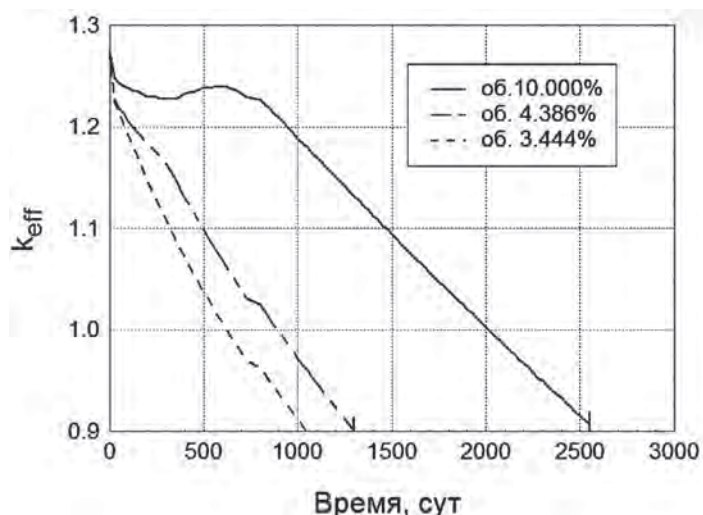


Рис. 3. Изменение размножающих свойств ТВСА

составляет более 1300 эфф. сут (приблизительно 4 года). Продолжительность эксплуатации ТВСА с начальным обогащением 10,0 %, содержащей, как уже указывалось, 36 ТВЭГ, составляет более 2500 эфф. сут (около 8 лет), при тех же размножающих свойствах выгружаемых ТВС.

Повышение обогащения ТВС до 10 % и связанное с ним увеличение количества стержней с выгорающим поглотителем приведет к снижению эффективности регулирующих стержней. Рассмотрим этот эффект количественно. Расчеты проводились с использованием модели реакторной ячейки, показанной на рис. 2. Как видно из рис. 2, б, в такой модели на 160 ТВС приходится 60 ТВС со стержнями СУЗ. Эти данные незначительно отличаются от реальных параметров активной зоны ВВЭР-1000 (из 163 ТВС 61 находятся под стержнями СУЗ):

$$k_{\text{eff}} = 1,27 \text{ — штатная ТВСА без стержней СУЗ};$$

$$k_{\text{eff}} = 1,17848 \pm 0,00032 \text{ — штатная ТВСА + СУЗ};$$

$$k_{\text{eff}} = 1,20787 \pm 0,00031 \text{ — ТВСА с обогащением 10 \% + СУЗ}.$$

**Анализ аварийной ситуации, связанной с расплавом активной зоны.** Для анализа аварийных ситуаций приведем некоторые справочные данные относительно плотности и температуры плавления наиболее характерных реакторных материалов:

Материал	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Температура плавления, °С
Сталь	7,7–7,9	1450–1520
Zr	6,49	1852
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,407	2350
B <sub>4</sub> C	2,52	2350
UO <sub>2</sub>	10,9	2800

Как видно из приведенных данных, именно топливо — двуокись урана — наиболее долго сохраняет свои геометрические формы с повышением температуры. Этот факт необходимо учесть при разработке математических моделей различных стадий развития аварийной ситуации. Наиболее тяжелые аварийные ситуации связаны с потерей теплоносителя в результате каких-либо повреждений трубопроводов или потерей электроснабжения с последующим выкипанием теплоносителя. Итак, рассмотрим модели, приведенные на рис. 2, но без воды внутри и вокруг ТВС.

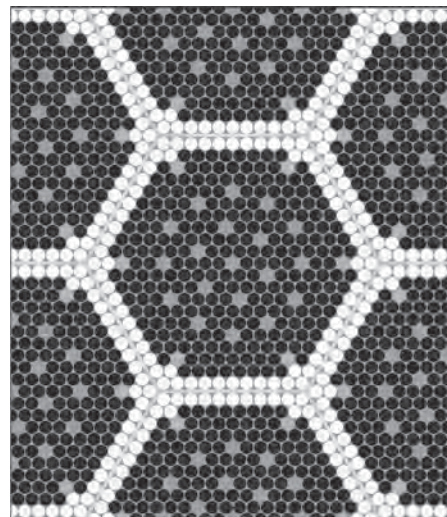


Рис. 4. Модель расплыва топлива в результате повышения температуры, вызванного потерей теплоносителя

Для штатной ТВСА:

$$k_{\text{eff}} = 0,63211 \pm 0,00016 \text{ — со стержнями СУЗ в активной зоне};$$

$$k_{\text{eff}} = 0,67279 \pm 0,00029 \text{ — без стержней СУЗ}.$$

Для ТВСА с обогащением 10 %:

$$k_{\text{eff}} = 0,97378 \pm 0,00040 \text{ — со стержнями СУЗ в активной зоне};$$

$$k_{\text{eff}} = 1,02315 \pm 0,00036 \text{ — без стержней СУЗ}.$$

Последний результат является особенно неблагоприятным: он свидетельствует о возможности достижения критичности в топливной системе без замедлителя.

Дальнейшее повышение температуры приводит к расплыванию топливных стержней с соответствующим уменьшением плотности топлива (рис. 4). Коэффициент размножения несколько увеличивается:

$$k_{\text{eff}} = 0,73165 \pm 0,00036 \text{ — штатная ТВСА};$$

$$k_{\text{eff}} = 1,06682 \pm 0,00046 \text{ — ТВСА с обогащением 10 \%}.$$

Дальнейшее развитие аварии приводит к началу плавления активной зоны. Предположим, что в результате плавления топлива в верхней части ТВС (которая раньше осталась без воды) происходит заполнение расплавленным топливом межтвэльного пространства в нижней части ТВС (длина перекрытия расплавленным топливом межкассетных зазоров — 1,5 м, рис. 5).

Если предположить наличие стержней СУЗ, то

$$k_{\text{eff}} = 0,65100 \pm 0,00035 \text{ — штатная ТВСА};$$

$$k_{\text{eff}} = 1,04933 \pm 0,00048 \text{ — ТВСА с обогащением 10 \%}.$$

Если же предположить, что поглощающие стержни и направляющие каналы в самом начале процесса расплавились и стекли в нижнюю часть корпуса реактора (КР), получим:

$$k_{\text{eff}} = 0,70747 \pm 0,00042 \text{ — штатная ТВСА};$$

$$k_{\text{eff}} = 1,06725 \pm 0,00045 \text{ — ТВСА с обогащением 10 \%}.$$

Дальнейшее развитие аварийной ситуации в результате различных температур плавления различных материалов приводит к тому, что первыми на днище КР стекают расплавленные конструкционные материалы, и если днище еще холодное (например, охлаждается снаружи), застывают на нем. Сверху на них стекает расплавленное топливо (рис. 6). В этом случае

$$k_{\text{eff}} = 0,74560 \pm 0,00051 \text{ — штатная ТВСА};$$

$$k_{\text{eff}} = 1,05735 \pm 0,00062 \text{ — ТВСА с обогащением 10 \%}.$$

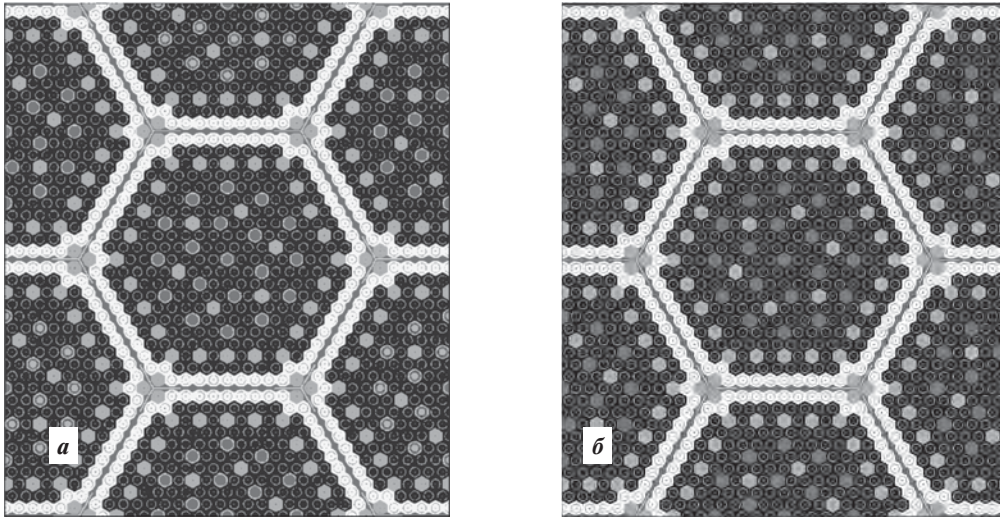


Рис. 5. Модель начала плавления топлива в активной зоне:  
 а — при наличии в активной зоне стержней СУЗ; б — стержни СУЗ отсутствуют

Затем расплавленные конструкционные материалы, как более легкие, всплывают над расплавленным топливом (рис. 7). В этом случае

$$k_{\text{eff}} = 0,71890 \pm 0,00044 \text{ — штатная ТВСА};$$

$$k_{\text{eff}} = 1,06048 \pm 0,00049 \text{ — ТВСА с обогащением } 10 \text{ \%}.$$

**Некоторые характеристики обращения с отработавшим ядерным топливом (активность ОЯТ и остаточное энерговыделение).** Активность и остаточное энерговыделение в ОЯТ в зависимости от времени его послеексплуатационного

охлаждения приведены на рис. 8 и 9. Как видно из графиков, с увеличением начального обогащения топлива и, соответственно, глубины его выгорания необходимое время охлаждения ОЯТ увеличивается не пропорционально, а значительно быстрее (более чем в 3 раза, см. рис. 9). Следствие — неизбежное переполнение бассейна выдержки.

Результаты расчетов по изотопному составу ОЯТ представлены в табл. 1. В качестве условия для сопоставления

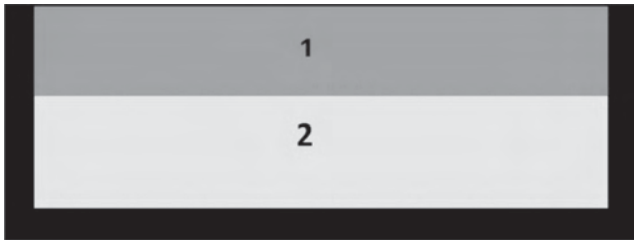


Рис. 6. Положение расплава в начальной фазе плавления аварийной зоны:

1 — расплавленное топливо; 2 — расплав конструкционных материалов (в том числе поглотителей)



Рис. 7. Положение расплава в заключительной фазе плавления аварийной зоны:

1 — расплавленное топливо; 2 — расплав конструкционных материалов (в том числе поглотителей)

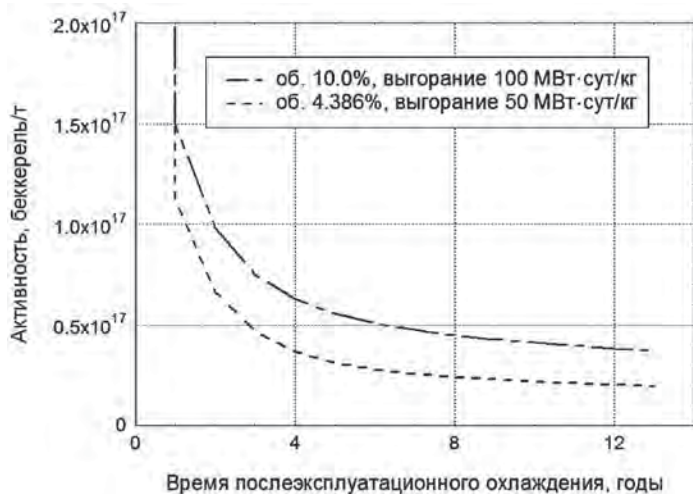


Рис. 8. Изменение активности ОЯТ в зависимости от времени выдержки

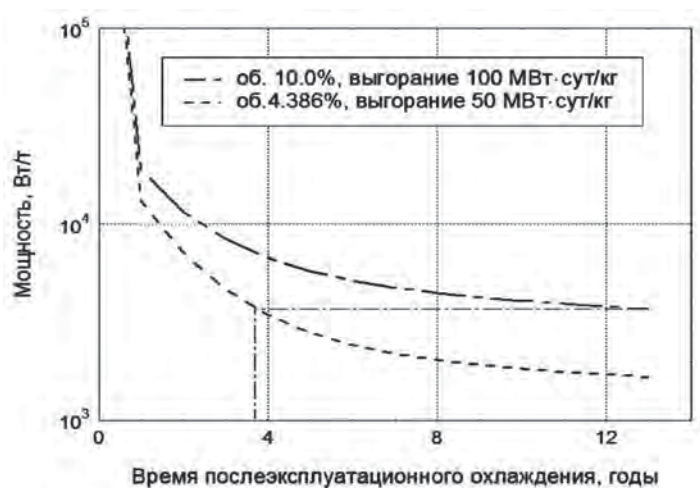


Рис. 9. Изменение остаточного энерговыделения ОЯТ в зависимости от времени выдержки

Таблица 1. Концентрация некоторых изотопов в отработавшем топливе

Обогащение ТВС, %	$k_{eff}$	Burnup ГВт·сут/т U	U-235	Pu-239	Pu-241	Cs-134	Cs-137	Eu-154
			г/т U					
4,386	0,9119	50	1,06E+04	6,30E+03	1,63E+03	1,63E+02	1,61E+03	3,39E+01
10	0,9151	100	2,23E+04	8,89E+03	2,60E+03	3,55E+02	3,10E+03	8,20E+01

концентрации изотопов выбрано равенство размножающих свойств ОЯТ в конце эксплуатации: ТВСА со средним обогащением 4,386 % и выгоранием 50 МВт·сут/кг U имеет размножающие свойства такие же, как и ТВСА со средним обогащением 10,0 % и выгоранием 100 МВт·сут/кг U. Как следует из приведенных данных, концентрация U-235 в ОЯТ увеличивается более чем в 2 раза. Существенно увеличивается и концентрация делящихся изотопов плутония, из-за чего, скорее всего, возрастет привлекательность переработки ОЯТ.

### Выводы

Преимущества повышения обогащения топлива свыше 5 %:

1) увеличение длительности кампании с 12 до 18—24 месяцев или уменьшение количества ежегодно перегружаемого топлива, т. е. улучшение топливоиспользования за счет снижения продолжительности перегрузки и повышения коэффициента использования установленной мощности;

2) снижение количества отработавших ТВС на единицу выработанной электроэнергии, т. е. улучшение показателей back-end части топливного цикла.

Недостатки:

1) повышение стоимости топлива (как следствие повышения обогащения);

2) увеличение необходимого времени выдержки отработавших ТВС в бассейне выдержки, поскольку ТВС выгружаются более горячими и высокоактивными (за счет увеличения выгорания).

Проблемные вопросы анализа безопасности:

1) необходимость дополнительных анализов безопасности при использовании современных систем обращения с топливом — дополнительных анализов критичности и радиационной безопасности;

2) возможность достижения критичности уже с одной ТВС;

3) возможность ситуации, когда потеря гетерогенности системы приводит к повышению ее размножающих свойств;

4) возможность достижения критичности в системе без замедлителя (т. е. при полной потере воды). Как показали дополнительные расчеты, для модели ТВСА без утечки нейтронов (на границах расчетной ячейки использовались условия отражения) достаточно обогащения 6,5 %;

5) все расчеты, касающиеся отработавшего топлива, были проведены в предположении “свежего топлива”, т. е. без учета снижения размножающих свойств топлива с выгоранием. По-видимому, при обосновании безопасности

существует необходимость более широкого внедрения принципа “burnup credit” с учетом значительно большего, чем принято на сегодняшний день, количества изотопов в отработавшем топливе из-за изменения баланса делящихся изотопов в отработавшем топливе;

6) необходимость дополнительного адекватного (по геометрии и материальным характеристикам систем) валидационного материала для анализа изотопного состава и критичности, т. е. необходимость дополнительных бенчмарк-экспериментов.

### Список использованной литературы

1. Optimum Cycle Length and Discharge Burnup for Nuclear Fuel: Phase II: Results Achievable with Enrichments Greater than 5.0 w/o, EPRI, Palo Alto, CA and U.S. Department of Energy, Washington, DC: 2002. 1003217.

2. SCALE User's Manual. NUREG/CR-0200 Revision 6. RNL/NUREG/CSD-2/V2/R6.

3. Y. Kovbasenko, V. Khalimonchuk, A. Kuchin, Y. Bilodid, M. Yeremenko, O. Dudka, NUREG/CR-6736, PNNL-13694 “Validation of SCALE Sequence CSAS26 for Criticality Safety Analysis of VVER and RBMK Fuel Designs”, Washington, U.S. NRC, 2002.

### References

1. Optimum Cycle Length and Discharge Burnup for Nuclear Fuel, Phase II, Results Achievable with Enrichments Greater than 5.0 w/o, EPRI, Palo Alto, CA and U.S. Department of Energy, Washington, DC, 2002, 1003217.

2. SCALE User's Manual, NUREG/CR-0200 Revision 6, RNL/NUREG/CSD-2/V2/R6.

3. Kovbasenko, Yu., Khalimonchuk, V., Kuchin, A., Bilodid, Ye., Yeremenko, M., Dudka, O. (2002), NUREG/CR-6736, PNNL-13694 “Validation of SCALE Sequence CSAS26 for Criticality Safety Analysis of VVER and RBMK Fuel Designs”, Washington, U.S. NRC.

Получено 26.10.2015.