

# ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГРАММЫ UNK ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАСЧЕТА ТЕСТОВЫХ ЯЧЕЕК И ТВС РЕАКТОРА ВВЭР-1000

Е.В. Чернов, В.Г. Зимин

В.Д. Давиденко, В.Ф. Цибульский,

*Лаборатория тренажерных систем,  
Московский Инженерно-Физический Институт,  
Каширское шоссе 31, Москва, 115409  
E-mail: [tchernov@ets.mephi.ru](mailto:tchernov@ets.mephi.ru), [slava@ets.mephi.ru](mailto:slava@ets.mephi.ru)*

*Институт ядерных реакторов  
РНЦ «Курчатовский институт»,  
Пл. Курчатова, 1, Москва, 123182,  
E-mail: [unk@dhttp.kiae.ru](mailto:unk@dhttp.kiae.ru)*

## АННОТАЦИЯ

В докладе представлены результаты расчетов по программе UNK тестовых ячеек и ТВС реактора ВВЭР-1000. Полученные результаты сравнивались с результатами программ HELIOS, TVS-M, MCU, WIMS. Данная работа выполнена в рамках тестирования программы UNK с целью её дальнейшего использования в подготовке нейтронно-физических сечений для малогрупповых диффузационных расчетов реактора ВВЭР-1000.

Приведены результаты расчета двух наборов тестовых задач. Первый набор включает ячейки и ТВС с урановым и МОХ топливом. Второй набор представляет собой два типа ТВС с урановым и МОХ топливом, содержащие 12 твэлов с Gd. Для каждого типа топлива рассмотрены состояния с различными значениями температуры топлива, температуры и плотности теплоносителя, концентрации борной кислоты, концентрации ксенона и самария, с погруженным и извлеченным кластером СУЗ (для ТВС). Эти результаты используются в расчете эффектов реактивности. Для состояний с номинальными значениями параметров ячейки (ТВС) выполнен расчет выгорания.

Сравнивались значения следующих величин: коэффициент размножения и его зависимость от выгорания, эффекты реактивности, веса кластеров СУЗ и концентрации некоторых изотопов в зависимости от выгорания. Программы UNK, HELIOS и TVS-M дают близкие результаты для всех сравниваемых параметров.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Для проведения расчетов реакторов типа ВВЭР с целью сопровождения эксплуатации, а также в составе программного обеспечения тренажеров и анализаторов различного класса используются малогрупповые диффузационные программы. Большое влияние на точность расчета нейтронно-физических характеристик реактора оказывает качество подготовки малогрупповых нейтронно-физических констант. Верификация программы UNK (Цибульский и Давиденко, 2002) проводится с целью её дальнейшего использования в подготовке нейтронно-физических сечений для малогрупповых реакторных расчетов. Краткое описание программы UNK представлено в разделе 2.

В рамках верификации программы UNK рассмотрены два набора тестовых задач. Первый набор тестовых задач включает расчет ряда состояний ячейки и ТВС реактора ВВЭР-1000 с урановым и МОХ топливом (Lazarenko and Pavlovichev, 1998). Состояния ячеек и ТВС, рассмотренные в тестовых задачах, различаются температурой топлива и теплоносителя, плотностью теплоносителя, концентрацией борной кислоты и величиной отравления ксеноном и самарием. Результаты расчета различных состояний используются для определения эффектов реактивности: эффекта отравления ксеноном и самарием, эффекта по бору, Допплер эффекта и комбинированного температурного эффекта. Для ТВС определяется также вес кластера СУЗ. Для состояния с номинальными значениями параметров проводится расчет выгорания топлива до значения 60 МВт\*сут/кг. Расчеты ячеек и ТВС проводятся при фиксированной величине аксиального баклинга  $0.003 \text{ см}^{-2}$ . Описание тестовых ячеек и ТВС, результаты расчета по программе UNK и сравнения с результатами программ HELIOS (Gehin et al., 1999), TVS-M (Lazarenko et al.,

1998), WIMS-ABBN (Bagretsova et al., 1998) представлены в разделе 3. Сравнивались значения следующих функционалов:

- коэффициент размножения для различных состояний ячеек и ТВС;
- значения эффектов реактивности;
- зависимость коэффициента размножения нейтронов от выгорания топлива;
- потвэльное распределение поля энерговыделения в ТВС.

Второй набор тестовых задач представляет собой ряд состояний ТВС реактора ВВЭР-1000, содержащих 12 стержней с выгорающим гадолиниевым поглотителем (Kalugin et al., 2000). Рассматриваются два типа ТВС с однородным урановым и профилированным МОХ топливом. Для номинального состояния проводится расчет выгорания топлива до значения 40 МВт\*сут/кг. Расчеты ТВС выполняются при условии отражения на внешней границе. Описание тестовых ТВС, результаты расчета по программе UNK и сравнение с результатами программ MCU, TVS-M и HELIOS представлены в разделе 4. Все результаты используемые для сравнения взяты из отчета (Kalugin et al., 2000). Сравнивались значения следующих функционалов:

- коэффициент размножения для различных состояний ТВС;
- значения эффектов реактивности;
- зависимость коэффициента размножения нейтронов от выгорания;
- зависимость концентрации изотопов  $^{155}\text{Gd}$ ,  $^{157}\text{Gd}$ ,  $^{135}\text{Xe}$  и  $^{149}\text{Sm}$  от выгорания;
- потвэльное распределение поля энерговыделения в ТВС.

Раздел 5 завершает статью представляя заключение и выводы.

## 2. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ UNK

Программа UNK (Цибульский и Давиденко, 2002) предназначена для расчета нейтронно-физических характеристик ячеек и ТВС ядерных реакторов различного типа. Библиотека ядерных данных программы включает около 300 изотопов и рассчитана с помощью программы NJOY из файлов оцененных данных ENDF/B-VI, JEFF-2.2 и JENDL-3.2. Основная энергетическая сетка включает 89 групп: 24 группы в области замедления до 2.15 эв и 65 тепловых групп. Интегральное уравнение переноса нейтронов в транспортном приближении решается методом вероятности первых столкновений (ВПС). Матрицы метода ВПС рассчитываются аналитически в случае одномерной геометрии, для сложной геометрии матрицы определяются численным интегрированием с использованием метода характеристик. В программе имеются две возможности решения задачи замедления в области разрешенных резонансов:

- прямой расчет с использованием микрогрупп. Микрогрупповая энергетическая сетка выбирается в зависимости от структуры резонансов сечений различных изотопов, входящих в состав топливной композиции. Сетка сгущается в окрестности каждого резонанса и расширяется в той области, где резонансов нет. Для детального описания энергетического распределения возможно введение до 7000 микрогрупп. В текущей библиотеке можно использовать микрогруппы при расчете резонансов  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{166}\text{Er}$ ,  $^{167}\text{Er}$ , Zr-nat.
- с использованием теоремы эквивалентности в приближении "узкого резонанса".

Расчет выгорания топлива проводится с использованием аналитического интегрирования, учитывается более чем 200 продуктов деления.

В данной работе представлены результаты полученные по программе UNK без использования микрогрупп, так как эту опцию программы планируется использовать для расчетов сечений ТВС реактора ВВЭР-1000.

### **3. Результаты расчета тестовых ячеек и ТВС реактора ВВЭР-1000 с урановым и MOX топливом**

Первый набор тестовых задач включает в себя расчет различных состояний ячеек и ТВС реактора ВВЭР-1000 с урановым и MOX топливом.

#### **3.1 Описание тестовых ячеек и ТВС реактора ВВЭР-1000 с урановым и MOX топливом**

Краткое описание тестовых задач приведено ниже, полное описание представлено в отчете (Lazarenko and Pavlovichev, 1998). Трехзонная шестигранная ячейка реактора ВВЭР включает в себя топливо, оболочку и теплоноситель. Радиус топлива 0.386 см, радиус оболочки 0.4582 см, половина «размера под ключ» ячейки 0.6375 см. Модель ТВС реактора ВВЭР-1000 содержит 331 ячейку, из них 312 ячеек являются топливными, 19 ячеек содержат замедлитель, 18 из них могут содержать поглощающий стержень. Размер ТВС «под ключ» составляет 23.6 см, шаг решетки твэл равен 1.275 см. Рассчитанные варианты топлива ячеек и ТВС представлены в Табл. 1. Описание различных состояний ячеек и ТВС приведено в Табл. 2. Расчет выгорания топлива ячеек (варианты V1 и V2) и ТВС (варианты V11 и V12) проводится для состояния S1 до значения 60 МВт\*сут/кг при энерговыделении 108 МВт/м<sup>3</sup>. Следует отметить два момента, которые вносят дополнительную неопределенность в результаты расчета. Во-первых, топливо содержит заданные «равновесные» значения ксенона и самария. Очевидно, что реальные равновесные концентрации ксенона и самария зависят от программы расчета. Кроме того, в teste не заданы концентрации йода и прометия. Оба эти фактора приводят к тому что в начале расчета выгорания наблюдается переходный процесс связанный с установлением равновесных значений ксенона, йода, самария и прометия. Вторым недостатком этого теста на наш взгляд является задание большого значения аксиального баклинга  $B^2 = 0.003 \text{ см}^{-2}$ , что вносит дополнительную неопределенность в расчет коэффициента размножения.

#### **3.2 Результаты расчетов тестовых ячеек и ТВС реактора ВВЭР-1000 с урановым и MOX топливом**

Результаты расчета коэффициента размножения нейтронов для пяти состояний ячейки (S1, S3-S6) и 6 состояний ТВС реактора ВВЭР-1000 с урановым (варианты V1, V11) и MOX (варианты V2, V12) топливом представлены в Табл. 3. В этой же таблице для сравнения приведены результаты расчета по программам HELIOS, TSV-M, WIMS-ABBN из работы (Kalugin et al., 2000). Для анализа полученных данных результаты по программе HELIOS были приняты за эталон. На Рис. 1 представлена отклонения коэффициента размножения полученного по программам UNK, TSV-M, WIMS-ABBN от эталона. Среднеквадратичное отклонение результатов программы UNK от эталона рассчитанное по всем состояниям составляет 0.3% для уранового топлива и 0.4 % для MOX топлива. В случае MOX топлива результаты по программе UNK систематически ниже эталона, смещение средних величин рассчитанных по всем состояниям составляет 0.3 %. Максимальное отклонение в коэффициенте размножения для свежего топлива составляет 0.6 %.

По значениям коэффициента размножения в различных состояниях рассчитаны эффекты реактивности: эффект отравления ксеноном и самарием, эффект по бору, Допплер-эффект по температуре топлива и комбинированный температурный эффект. Для ТВС также определяется вес кластера СУЗ. Результаты расчета эффектов

реактивности представлены в Табл. 4. На Рис. 2 представлены отклонения эффектов реактивности от эталонных значений рассчитанных по программе HELIOS. В расчете эффектов реактивности все программы дают достаточно близкие результаты. Максимальные отклонения результатов UNK от эталона не превышают 4% для эффектов по ксенону и самарию, эффекта по бору и комбинированному температурному эффекту. Максимальное отклонение в Допплер-эффекте по температуре топлива составляет 6.5% для ячейки с урановым топливом. Вес кластера СУЗ для обоих типов ТВС различается менее чем на 0.5%.

Результаты расчета зависимости коэффициента размножения от выгорания для ячеек и ТВС представлены в Табл. 5 и 6, соответственно. Расчеты по программе UNK выполнены с постоянным шагом 0.5 МВт×сут/кг. В таблицах также приведены результаты по программам HELIOS (Gehin et al., 1999), TVS-M (Lazarenko et al., 1998), WIMS-ABBN (Bagretsova et al., 1998), использованные для сравнения. На Рис. 3 приведены отклонения от эталона коэффициента размножения в зависимости от выгорания. В случае ячейки с урановым топливом результаты по UNK систематически превышают этalon на 0.15 %, а в случае ТВС с урановым топливом ниже эталона в среднем на 0.5 %. Максимальное отклонение в коэффициенте размножения для уранового топлива составляет 0.7 %. В случае MOX топлива, коэффициент размножения по программе UNK систематически ниже эталона, для ячейки на 0.4%, для ТВС на 1.2 %. Максимальное отклонение в коэффициенте размножения для MOX топлива составляет 1.4 % при выгорании 60 МВт×сут/кг.

На Рис. 4 показан пример сравнения поля энерговыделения для ТВС с урановым топливом для состояния S2 (с кластером СУЗ) при выгорании 0 и 60 МВт×сут/кг. Максимальные отклонения в обоих случаях наблюдаются в мощности угловых максимально-напряженных твэлов, различия составляют около 5% и слабо зависят от выгорания.

#### **4. Результаты расчета ТВС реактора ВВЭР-1000 с выгорающим гадолиниевым поглотителем**

Второй набор тестовых задач включает в себя расчет двух типов ТВС реактора ВВЭР-1000, содержащих 12 твэлов с гадолинием (Kalugin et al., 2000).

##### **4.1 Описание тестовых ТВС реактора ВВЭР-1000 с выгорающим гадолиниевым поглотителем**

Второй набор тестовых задач является продолжением предыдущей работы и представляет собой два типа ТВС, каждая из которых содержит 12 стержней с выгорающим гадолиниевым поглотителем (Kalugin et al., 2000). Рассматриваются ТВС с однородным урановым и профилированным MOX топливом. Описание состава топлива приведено в Табл. 7. Как и в предыдущей задаче рассчитываются несколько состояний для расчета эффектов реактивности. Описание состояний ТВС представлено в Табл. 8. Расчет выгорания топлива ТВС (варианты UGd и MOXGd) проводится для состояния S1 до значения 40 МВт\*сут/кг при энерговыделении 108 МВт/м<sup>3</sup>. Стоит отметить, что данная задача лишена недостатков предыдущего теста, т.е. значение равновесной концентрации ксенона и самария не задано, а рассчитывается по каждой программе и аксиальная утечка нейтронов не учитывается. Результаты расчета данного теста по программам MCU, HELIOS, TVS-M, WIMS8A, MULTICELL приведены в отчете (Kalugin et al., 2000). Для сравнения использовались результаты MCU, HELIOS и TVS-M.

## 4.2 Результаты расчета тестовых ТВС реактора ВВЭР-1000 с выгорающим гадолиниевым поглотителем

Расчет равновесной концентрации  $^{135}\text{Xe}$  и  $^{149}\text{Sm}$  для состояния S1 выполнен по программе UNK методом установления, т.е. проводился расчет выгорания, при этом концентрация всех изотопов кроме заданных не изменялась. В расчете учитывался только выход  $^{149}\text{Sm}$  через  $^{149}\text{Pm}$ , таким образом менялась концентрация следующих изотопов:  $^{135}\text{I}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{149}\text{Sm}$ ,  $^{149}\text{Pm}$ . Полученные значения концентрации этих изотопов использовались в расчетах состояния S1.

Результаты расчета коэффициента размножения нейтронов для пяти состояний ТВС реактора ВВЭР-1000 с уран-гадолиниевым (UGd) и МОХ-гадолиниевым (MOXGd) топливом представлены в Табл. 9. На Рис. 6 представлены отклонения коэффициента размножения полученного по программам UNK, TVS-M, MCU от результатов по программе HELIOS, принятой за эталон. Среднеквадратичное отклонение результатов программы UNK от эталона рассчитанное по всем состояниям составляет 0.4% для уранового топлива и 0.2 % для МОХ топлива. Для обоих видов топлива результаты по программе UNK систематически ниже эталона, смещение средних величин рассчитанных по всем состояниям составляет 0.3 % для уранового топлива и 0.15 % для МОХ топлива. Максимальное отклонение в коэффициенте размножения для свежего топлива составляет 0.4 %.

По значениям коэффициента размножения в различных состояниях рассчитаны эффекты реактивности: эффект отравления ксеноном и самарием, эффект по бору, Допплер-эффект по температуре топлива и комбинированный температурный эффект. Результаты расчета эффектов реактивности представлены в Табл. 10. На Рис. 7 представлены отклонения эффектов реактивности от эталонных значений по программе HELIOS. В расчете эффектов реактивности все программы дают достаточно близкие результаты. Максимальные отклонения результатов по UNK от эталона не превышают 4% для эффекта по бору, Допплер-эффекту по температуре топлива и комбинированному температурному эффекту. Максимальное отклонение в эффекте по ксенону и самарию составляет 1.3%.

Результаты расчета зависимости коэффициента размножения от выгорания представлены в Табл. 11. В этой же таблице приведены усредненные по ТВС концентрации изотопов:  $^{155}\text{Gd}$ ,  $^{157}\text{Gd}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{149}\text{Sm}$ . Расчеты по программе UNK выполнены с постоянным шагом 0.5 МВт×сут/кг. В текущей версии программы UNK нет возможности расчитывать факторы блокировки для кольцевых зон, поэтому расчет проводился с одной зоной в топливе с гадолинием. На Рис. 8 приведены отклонения от эталона коэффициента размножения в зависимости от выгорания. Как для уранового так и для МОХ топлива наблюдается синусоидальное отклонение коэффициента размножения ТВС на интервале от 0 до 10÷15 МВт×сут/кг, что по-видимому определяется погрешностью программы UNK в расчете выгорания гадолиния.

На Рис. 8 показано влияние изотопов  $^{155}\text{Gd}$ ,  $^{157}\text{Gd}$ ,  $^{149}\text{Sm}$  и  $^{135}\text{Xe}$  на коэффициент размножения ТВС в зависимости от выгорания. Изменение коэффициента размножения  $\Delta k_{\text{eff}}^i$  под влиянием изотопа  $i$  рассчитывается следующим образом

$$\Delta k_{\text{eff}}^i = \left[ k_{\text{eff}}^i / k_{\text{eff}} - 1 \right] \times 100,$$

где  $k_{\text{eff}}$  - исходный коэффициент размножения ТВС, который рассчитывается по

двухгрупповым сечениям:  $k_{\text{eff}} = \frac{\nu \Sigma_{f1} + r_{\infty} \nu \Sigma_{f2}}{\Sigma_s^{1 \rightarrow 2} + \Sigma_{a2}}$ ;  $r_{\infty} = \Sigma_s^{1 \rightarrow 2} / \Sigma_{a2}$ ;

$k_{eff}^i$  - коэффициент размножения ТВС без учета поглощения на изотопе  $i$ , т.е. при расчете которого по предыдущей формуле сечения поглощения корректируются следующим образом:  $\Sigma_{aj}^i = \Sigma_{aj}^i - \sigma_{aj}^i \rho_i$ ,  $j = 1, 2$ .

На Рис. 9 приведены отклонения концентрации  $^{155}\text{Gd}$  и  $^{157}\text{Gd}$  от эталона. Поскольку разница в конечной концентрации гадолиния не влияет на коэффициент размножения ТВС, отклонения нормированы на начальную концентрацию изотопов. Графики отклонений в коэффициенте размножения ТВС коррелируют с отклонениями в концентрации  $^{155}\text{Gd}$ . Например для уранового топлива максимальная ошибка в концентрации  $^{155}\text{Gd}$  в 4.5 % соответствует максимальной ошибке в -0.8 % в коэффициенте размножения на момент выгорания примерно 3 МВт×сут/кг. Максимальное различие в концентрации  $^{157}\text{Gd}$  составляют 9% на этот же момент времени, но отклонение противоположного знака. Для МОХ топлива зависимости подобны.

На Рис. 10 показаны отклонения от эталона концентрации  $^{135}\text{Xe}$  и  $^{149}\text{Sm}$ . С ростом выгорания различия в концентрации  $^{135}\text{Xe}$  растут линейно и составляют 4% и 6.5% для уранового и МОХ топлива на момент выгорания 40 МВт×сут/кг. Остальные программы: UNK, TSV-M и MCU дают существенно меньшую концентрацию  $^{149}\text{Sm}$  чем эталон. Концентрация по программе UNK минимальна и отклонение от эталона составляет около 20% на интервале выгорания от 20 до 40 МВт×сут/кг.

На Рис. 11 показан пример сравнения поля энерговыделения для свежего уран-гадолиниевого топлива для состояний S2 (без ксенона) и S5 (холодное состояние). Как и в случае с ТВС без гадолиния, максимальные различия наблюдаются в мощности угловых твэлов, различия составляют 3.3% для состояния S2 и 5% для состояния S5.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По программе UNK проведены верификационные расчеты тестовых ячеек и ТВС реактора ВВЭР-1000, содержащих урановое и МОХ топливо. Рассмотрены несколько состояний ячеек и ТВС, в которых варьируются температура топлива и замедлителя, плотность замедлителя, концентрация бора и величина отравления ксеноном и самарием. Для каждого вида топлива рассмотрены ТВС с погруженным и извлеченным кластером СУЗ и ТВС, содержащие 12 стержней с выгорающим гадолиниевым поглотителем. Проведены расчеты выгорания топлива ячеек и ТВС. Результаты расчетов по программе UNK сравнивались с результатами аналогичных расчетов по программам HELIOS, MCU, WIMS и TSV-M.

Среднеквадратичное отклонение результатов расчета по программе UNK коэффициента размножения для различных состояний ячеек и ТВС со свежим урановым и МОХ топливом составляет 0.3%. В случае МОХ топлива результаты по программе UNK систематически ниже эталона, смещение средних величин составляет 0.3 %. Максимальное отклонение в коэффициенте размножения для свежего топлива составляет 0.6 %.

По результатам расчета различных состояний ячеек и ТВС проведен расчет эффектов реактивности по отравлению Xe и Sm, по бору, по температуре топлива и комбинированного температурного эффекта. Для ТВС рассчитан вес кластеров СУЗ. В эффектах реактивности UNK и HELIOS дают очень близкие результаты. Отклонения результатов по программе UNK не превышают:

- в эффекте по ксенону и самарию – 4%,
- в эффекте по бору – 4%,
- в Допплер-эффекте 6.5% (макс. различия для ячейки с урановым топливом),
- в комбинированном температурном эффекте – 4%,
- в весе кластера СУЗ – 0.5%.

Результаты расчета по программе UNK выгорания уранового и МОХ топлива (без гадолиния) приемлемо согласуются с эталонными данными. В случае ячейки с урановым топливом результаты по UNK систематически превышают этalon на 0.15 %, для ТВС результаты ниже эталона в среднем на 0.5%. В случае с МОХ топливом результаты по UNK систематически ниже эталона как для ячейки, так и для ТВС, средние различия составляют соответственно 0.4% и 1.2%. Максимальные различия на всем интервале выгорания составляют 0.7 % для уранового топлива и 1.4 % для МОХ топлива при выгорании 60 МВт×сут/кг.

Выгорание UGd и MOXGd ТВС проведено с одним слоем разбиения топлива с гадолинием. Связанная с этим погрешность расчета концентраций ядер Gd-155 (до 5%) и Gd-157 (до 13%) определяет отклонение от эталона коэффициента размножения нейтронов (до 0.8 %) на интервале от 0 до 15 МВт×сут/кг. Сравнивались также зависимости от выгорания концентрации изотопов  $^{135}\text{Xe}$  и  $^{149}\text{Sm}$ . Различия в равновесной концентрации ксенона линейно растут с ростом выгорания и составляют 4% и 6.5% для уранового и МОХ топлива на момент выгорания 40 МВт×сут/кг. Программы UNK, TVS-M и MCU дают существенно меньшую концентрацию  $^{149}\text{Sm}$  чем эталон. Концентрация по программе UNK минимальна и отклонение от эталона составляет около 20% на интервале выгорания от 20 до 40 МВт×сут/кг.

Сравнение потвэльного распределения поля энерговыделения в ТВС показывает что программа UNK систематически занижает мощность максимально-напряженных угловых твэлов, максимальные различия составляют около 5%.

Представленные результаты позволяют сделать вывод о возможности использования программы UNK для расчета нейтронных характеристик ячеек и ТВС реактора ВВЭР-1000 с урановым и МОХ топливом.

## ЛИТЕРАТУРА

В.Ф. Цибульский, В.Д. Давиденко. Программный комплекс UNK для детального расчета спектра нейтронов в ядерных реакторах. Отчет ИЯР/РНЦ «КИ». Инв.№35-410-4/81 от 18.05.2001. Москва.

Bagretsova, T.I. et. al (1998). Collision probability cell and assembly (WIMS-ABBN) calculations. In: Neutronics Benchmarks for the Utilization of Mixed Oxide Fuel: Joint U.S./Russian Progress Report for Fiscal Year 1997. Volume 3 – Calculations Performed in the Russian Federation. ORNL/TM-13603/V3, June 1998, pp. 4-205—4-244.

Gehin, J. C., C. Dourougie, M.B. Emmett, R.A. Lillie, (1999). Analysis of Weapons-Grade MOX VVER-1000 Benchmarks with HELIOS and KENO. ORNL/TM-1999/78.

Kalugin, M. and L. Maiorov, (1998). Calculations with the Monte Carlo (MCU) Method. In: Neutronics Benchmarks for the Utilization of Mixed Oxide Fuel: Joint U.S./Russian Progress Report for Fiscal Year 1997. Volume 3 – Calculations Performed in the Russian Federation. ORNL/TM-13603/V3, June 1998, pp. 4-23—4-113.

Kalugin M, D. Shkarovsky, J. Gehin, (2000). A VVER-1000 LEU and MOX assembly computational benchmark. NEA/NSC/DOC (2002).

Lazarenko, A. and A. Pavlovichev, (1998). Description of the VVER reactor computational benchmark. In: Neutronics Benchmarks for the Utilization of Mixed Oxide Fuel: Joint U.S./Russian Progress Report for Fiscal Year 1997. Volume 3 – Calculations Performed in the Russian Federation. ORNL/TM-13603/V3, June 1998, pp. 4-18—4-23.

Lazarenko, A., V. Sidorenko and S. Bolshugin, (1998). Spectral code (TVS-M) calculations. In: Neutronics Benchmarks for the Utilization of Mixed Oxide Fuel: Joint U.S./Russian Progress Report for Fiscal Year 1997. Volume 3 – Calculations Performed in the Russian Federation. ORNL/TM-13603/V3, June 1998, pp. 4-113—4-204.

Табл. 1. Варианты топлива тестовых ячеек и ТВС реактора ВВЭР-1000 с урановым и MOX топливом.

Вариант	Геометрия	Топливо	Состояния
V1	Ячейка	UO <sub>2</sub>	S1, S3-S6
V2	Ячейка	MOX	S1, S3-S6
V11	TBC	UO <sub>2</sub>	S1-S6
V12	TBC	MOX	S1-S6

Табл. 2. Состояния тестовых ячеек и ТВС реактора ВВЭР-1000 с урановым и MOX топливом.

Состояние	T <sub>fuel</sub> , K	T <sub>clad</sub> , K	Замедлитель	Кластер СУЗ	Отравление <sup>135</sup> Xe и <sup>149</sup> Sm
S1	1027	579	MOD1	Нет	Есть
S2	1027	579	MOD1	Есть	Есть
S3	1027	579	MOD2	Нет	Есть
S4	1027	579	MOD1	Нет	Нет
S5	579	579	MOD1	Нет	Нет
S6	300	300	MOD3	Нет	Нет

Замедлитель: MOD1 – горячий замедлитель ( $T_{cool}=579$  K,  $\gamma \approx 0.72$  g/cm<sup>3</sup>), концентрация бора 600 ppm; MOD2 – горячий замедлитель без бора; MOD3 – холодный замедлитель ( $T_{cool}=300$  K,  $\gamma \approx 1.00$  g/cm<sup>3</sup>), концентрация бора 600 ppm

Табл. 3 Коэффициент размножения для тестовых ячеек и ТВС реактора ВВЭР-1000 с урановым и MOX топливом

Вариант расчета	Коэффициент размножения $k_{eff}$			
	HELIOS	WIMS-ABBN	TVS-M	UNK
V1	S1	1.0648	1.0572	1.0617
	S3	1.1110	1.1024	1.1073
	S4	1.1039	1.0962	1.1028
	S5	1.1173	1.1109	1.1159
	S6	1.2207	1.2160	1.2200
V2	S1	1.0227	1.0149	1.0233
	S3	1.0469	1.0385	1.0477
	S4	1.0389	1.0310	1.0412
	S5	1.0551	1.0483	1.0569
	S6	1.1832	1.1779	1.1818
V11	S1	1.0791	1.0673	1.0757
	S2	0.8412	0.8361	0.8416
	S3	1.1351	1.1221	1.1313
	S4	1.1203	1.1085	1.1189
	S5	1.1326	1.1226	1.1307
	S6	1.2226	1.2156	1.2197
V12	S1	1.0483	1.0367	1.0486
	S2	0.8568	0.8537	0.8570
	S3	1.0788	1.0665	1.0795
	S4	1.0663	1.0551	1.0683
	S5	1.0812	1.0718	1.0826
	S6	1.1995	1.1927	1.1956

Табл. 4 Эффекты реактивности для тестовых ячеек и ТВС реактора ВВЭР-1000 с урановым и MOX топливом

Вар.	Эффект	Нач. сост. IS	Кон. сост. FS	Эффект реактивности $(k_{FS} - k_{IS}) \times 100 / (k_{IS} \times k_{FS})$			
				HELIOS	WIMS- ABBN	TVS-M	UNK
V1	Xe+Sm	S4	S1	-3.33	-3.37	-3.51	-3.36
	Boron	S3	S4	-3.90	-3.88	-3.88	-3.99
	T-fuel	S5	S4	-1.09	-1.21	-1.06	-1.16
	T-all	S6	S5	-7.58	-7.78	-7.65	-7.78
V2	Xe+Sm	S4	S1	-1.52	-1.54	-1.68	-1.57
	Boron	S3	S4	-2.26	-2.24	-2.28	-2.34
	T-fuel	S5	S4	-1.48	-1.60	-1.43	-1.53
	T-all	S6	S5	-10.26	-10.50	-10.00	-10.59
V11	Xe+Sm	S4	S1	-3.41	-3.48	-3.59	-3.45
	Boron	S3	S4	-4.57	-4.58	-4.57	-4.69
	T-fuel	S5	S4	-0.97	-1.13	-0.93	-1.02
	T-all	S6	S5	-6.50	-6.82	-6.45	-6.37
	CR worth	S2	S1	26.21	25.91	25.86	26.28
V12	Xe+Sm	S4	S1	-1.61	-1.68	-1.76	-1.65
	Boron	S3	S4	-2.70	-2.69	-2.73	-2.79
	T-fuel	S5	S4	-1.29	-1.48	-1.24	-1.33
	T-all	S6	S5	-9.12	-9.46	-8.73	-9.02
	CR worth	S1	S2	21.32	20.68	21.32	21.39

Табл. 5 Коэффициент размножения в зависимости от выгорания для тестовых ячеек реактора ВВЭР-1000 с урановым и MOX топливом

Выго- рание, МВт·с ут/кг	Коэффициент размножения $k_{eff}$							
	Вариант V1S1				Вариант V2S1			
	UNK	HELIOS	WIMS- ABBN	TVS-M	UNK	HELIOS	WIMS- ABBN	TVS-M
0	1.0668	1.0648	1.0572	1.0609	1.0201	1.0227	1.0149	1.0098
2	1.0491	1.0477	1.0407	1.0452	0.9805	0.9854	0.9781	0.9863
4	1.0317	1.0300	1.0232	1.0282	0.9605	0.9657	0.9586	0.9674
6	1.0137	1.0118	1.0053	1.0109	0.9434	0.9486	0.9417	0.9506
8	0.9962	0.9942	0.9881	0.9941	0.9281	0.9331	0.9264	0.9353
10	0.9796	0.9775	0.9718	0.9780	0.9140	0.9189	0.9123	0.9211
12	0.9638	0.9617	0.9564	0.9628	0.9009	0.9057	0.8993	0.9078
14	0.9489	0.9468	0.9419	0.9483	0.8886	0.8933	0.8872	0.8952
16	0.9347	0.9328	0.9282	0.9344	0.8770	0.8815	0.8757	0.8832
18	0.9212	0.9193	0.9150	0.9211	0.8659	0.8703	0.8649	0.8717
20	0.9082	0.9064	0.9025	0.9084	0.8553	0.8596	0.8546	0.8607
22	0.8957	0.8940	0.8904	0.8960	0.8451	0.8493	0.8447	0.8502
24	0.8836	0.8821	0.8787	0.8840	0.8353	0.8395	0.8351	0.8401
26	0.8719	0.8705	0.8675	0.8724	0.8260	0.8299	0.8259	0.8303
28	0.8606	0.8593	0.8566	0.8611	0.8169	0.8207	0.8171	0.8210
30	0.8496	0.8483	0.8460	0.8501	0.8082	0.8118	0.8084	0.8127
32	0.8388	0.8375	0.8356	0.8393	0.7997	0.8032	0.8001	0.8039
34	0.8284	0.8271	0.8256	0.8289	0.7915	0.7949	0.7920	0.7975
36	0.8182	0.8171	0.8158	0.8187	0.7836	0.7868	0.7842	0.7886
38	0.8082	0.8072	0.8063	0.8088	0.7760	0.7791	0.7767	0.7803
40	0.7986	0.7976	0.7970	0.7980	0.7686	0.7716	0.7694	0.7723
42	0.7891	0.7883	0.7880	0.7884	0.7614	0.7644	0.7623	0.7646
44	0.7800	0.7793	0.7792	0.7792	0.7546	0.7574	0.7555	0.7572
46	0.7711	0.7704	0.7706	0.7702	0.7479	0.7506	0.7489	0.7501
48	0.7625	0.7619	0.7623	0.7615	0.7415	0.7441	0.7426	0.7433
50	0.7542	0.7536	0.7543	0.7531	0.7353	0.7379	0.7364	0.7368
52	0.7462	0.7455	0.7465	0.7449	0.7293	0.7318	0.7306	0.7305
54	0.7384	0.7378	0.7389	0.7369	0.7236	0.7259	0.7249	0.7244
56	0.7309	0.7303	0.7317	0.7292	0.7181	0.7203	0.7195	0.7186
58	0.7237	0.7230	0.7247	0.7216	0.7128	0.7149	0.7143	0.7130
60	0.7168	0.7161	0.7179	0.7143	0.7077	0.7098	0.7093	0.7076

Табл. 6 Коэффициент размножения в зависимости от выгорания для тестовых ТВС реактора ВВЭР-1000 с урановым и MOX топливом

Выго- рание, МВт·с ут/кг	Коэффициент размножения $k_{eff}$							
	Вариант V11S1				Вариант V12S1			
	UNK	HELIOS	WIMS- ABBN	TVS-M	UNK	HELIOS	WIMS- ABBN	TVS-M
0	1.0763	1.0791	1.0673	1.0748	1.0428	1.0483	1.0367	1.0336
2	1.0595	1.0638	1.0527	1.0599	1.0016	1.0103	0.9999	1.0098
4	1.0429	1.0467	1.0360	1.0434	0.9808	0.9898	0.9798	0.9901
6	1.0255	1.0291	1.0187	1.0266	0.9627	0.9719	0.9620	0.9724
8	1.0084	1.0118	1.0017	1.0099	0.9462	0.9555	0.9456	0.9560
10	0.9917	0.9952	0.9854	0.9938	0.9309	0.9402	0.9305	0.9406
12	0.9758	0.9792	0.9699	0.9783	0.9165	0.9258	0.9164	0.9260
14	0.9604	0.9639	0.9551	0.9634	0.9028	0.9122	0.9030	0.9121
16	0.9457	0.9492	0.9408	0.9490	0.8896	0.8991	0.8903	0.8987
18	0.9314	0.9350	0.9272	0.9350	0.8770	0.8866	0.8781	0.8857
20	0.9176	0.9213	0.9139	0.9214	0.8648	0.8744	0.8663	0.8732
22	0.9042	0.9080	0.9011	0.9081	0.8530	0.8627	0.8550	0.8611
24	0.8911	0.8950	0.8887	0.8952	0.8415	0.8513	0.8440	0.8495
26	0.8782	0.8823	0.8765	0.8824	0.8303	0.8402	0.8333	0.8371
28	0.8657	0.8698	0.8646	0.8700	0.8195	0.8294	0.8229	0.8243
30	0.8533	0.8576	0.8530	0.8577	0.8090	0.8189	0.8128	0.8130
32	0.8412	0.8456	0.8416	0.8457	0.7987	0.8088	0.8030	0.8023
34	0.8293	0.8338	0.8304	0.8338	0.7888	0.7989	0.7934	0.7920
36	0.8176	0.8222	0.8195	0.8221	0.7791	0.7892	0.7842	0.7821
38	0.8061	0.8109	0.8087	0.8106	0.7698	0.7799	0.7752	0.7725
40	0.7948	0.7998	0.7982	0.7993	0.7607	0.7709	0.7665	0.7632
42	0.7838	0.7888	0.7879	0.7882	0.7519	0.7621	0.7581	0.7542
44	0.7730	0.7781	0.7778	0.7774	0.7434	0.7536	0.7500	0.7453
46	0.7625	0.7677	0.7679	0.7669	0.7353	0.7455	0.7422	0.7369
48	0.7523	0.7575	0.7583	0.7566	0.7274	0.7376	0.7346	0.7288
50	0.7423	0.7476	0.7490	0.7466	0.7198	0.7300	0.7274	0.7208
52	0.7327	0.7380	0.7399	0.7368	0.7125	0.7227	0.7204	0.7138
54	0.7234	0.7287	0.7311	0.7274	0.7056	0.7156	0.7137	0.7068
56	0.7144	0.7197	0.7226	0.7182	0.6989	0.7089	0.7073	0.6990
58	0.7058	0.7110	0.7144	0.7094	0.6925	0.7024	0.7011	0.6924
60	0.6976	0.7027	0.7066	0.7007	0.6864	0.6962	0.6953	0.6877

Табл. 7. Варианты топлива ТВС реактора ВВЭР-1000

с выгорающим гадолиниевым поглотителем.

Вариант	Топливо		Состояния
UGd	U1	LEU, обогащение 3.7%	S1-S5
	GD1	LEU, обогащение 3.6%, содержит 4.0% Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
MOXGd	PU1	MOX, обогащение 2.0% по делящемуся Ru	S1-S5
	PU2	MOX, обогащение 3.0% по делящемуся Ru	
	PU3	MOX, обогащение 4.2% по делящемуся Ru	
	GD1	LEU, обогащение 3.6%, содержит 4.0% Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	

Табл. 8 Состояния ТВС реактора ВВЭР-1000

с выгорающим гадолиниевым поглотителем.

Состояние	T <sub>fuel</sub> , K	T <sub>non-fuel</sub> , K	Замедлитель	Кластер СУЗ	Отравление <sup>135</sup> Xe и <sup>149</sup> Sm
S1	1027	575	MOD1	Нет	Равновесное
S2	1027	575	MOD1	Нет	Нет
S3	575	575	MOD1	Нет	Нет
S4	575	575	MOD2	Нет	Нет
S5	300	300	MOD3	Нет	Нет

Замедлитель: MOD1 – горячий замедлитель ( $T_{cool}=575$  K,  $\gamma=0.7235$  g/cm<sup>3</sup>), концентрация бора 0.6 г/кг; MOD2 – горячий замедлитель ( $T_{cool}=575$  K,  $\gamma=0.7235$  g/cm<sup>3</sup>) без бора; MOD3 – холодный замедлитель ( $T_{cool}=300$  K,  $\gamma=1.0033$  g/cm<sup>3</sup>) без бора

Табл. 9 Коэффициент размножения для ТВС реактора ВВЭР-1000 с выгорающим гадолиниевым поглотителем.

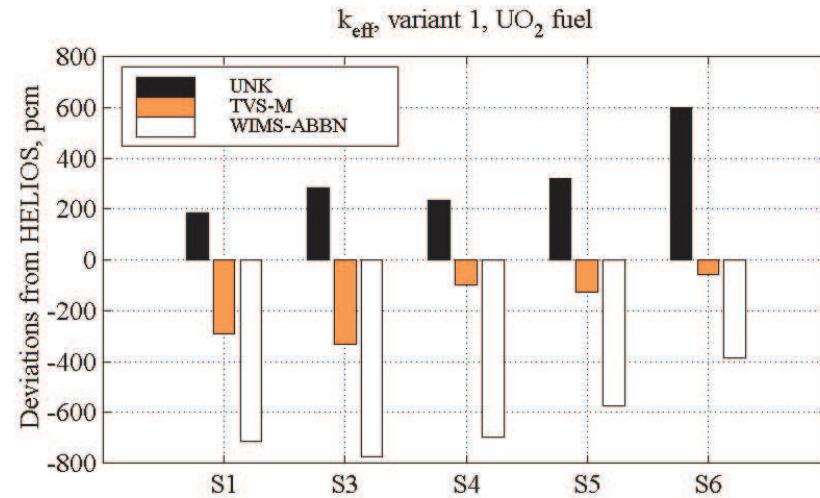
Вариант расчета		Коэффициент размножения $k_{eff}$			
		HELIOS	MCU	TVS-M	UNK
UGd	S1	1.1355	1.1353	1.1353	1.1309
	S2	1.1750	1.1779	1.1768	1.1706
	S3	1.1894	1.1899	1.1900	1.1854
	S4	1.2490	1.2499	1.2504	1.2459
	S5	1.3181	1.3197	1.3213	1.3131
MOX Gd	S1	1.1595	1.1551	1.1585	1.1577
	S2	1.1923	1.1873	1.1942	1.1906
	S3	1.2098	1.2045	1.2104	1.2080
	S4	1.2443	1.2384	1.2465	1.2437
	S5	1.3241	1.3176	1.3229	1.3213

Табл. 10 Эффекты реактивности для тестовых ячеек и ТВС реактора ВВЭР-1000 с выгорающим гадолиниевым поглотителем.

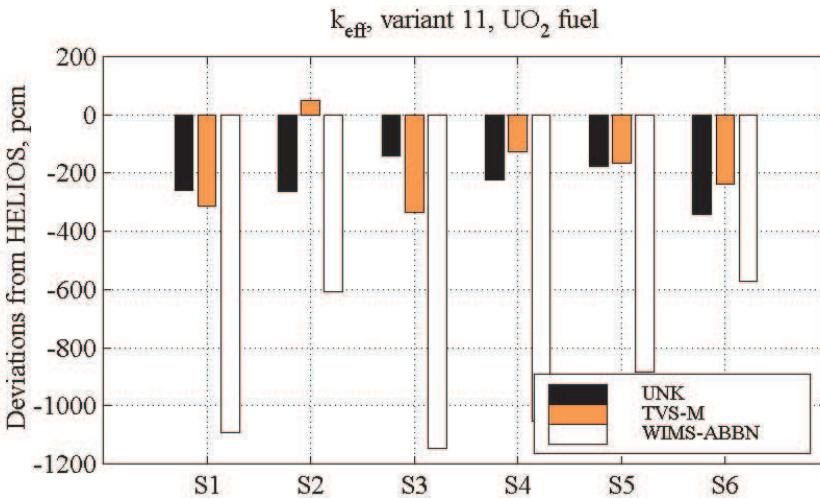
Вариант	Эффект	Нач. Сост.	Кон. Сост.	Эффект реактивности $(k_{FS} - k_{IS}) \times 100 / (k_{IS} \times k_{FS})$					
				IS	FS	HELIOS	MCU	TVS-M	UNK
UGd	Xe+Sm	S2	S1	-2.96		-3.19		-3.00	-2.96
	Boron	S4	S3	-4.01		-4.03		-4.10	-4.01
	T-fuel	S2	S3	1.03		0.86		1.07	1.03
	T-all	S5	S4	-4.20		-4.23		-4.11	-4.20
MOXGd	Xe+Sm	S2	S1	-2.37		-2.35		-2.39	-2.37
	Boron	S4	S3	-2.29		-2.27		-2.38	-2.29
	T-fuel	S2	S3	1.21		1.20		1.21	1.21
	T-all	S5	S4	-4.84		-4.85		-4.72	-4.84

Табл. 11 Зависимости от выгорания коэффициента размножения и средней по ТВС концентрации некоторых изотопов для тестовых ТВС реактора ВВЭР-1000 с выгорающим гадолиниевым поглотителем.

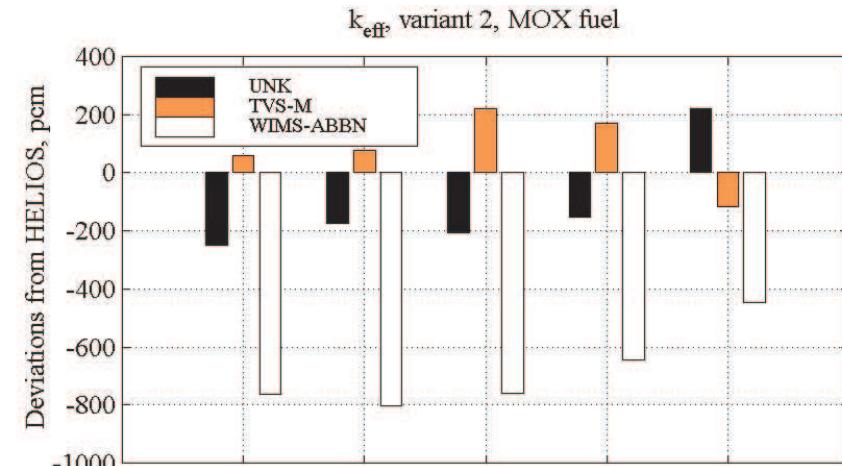
Выго- рание, МВт× сут/кг	Вариант UGd					Вариант MOXGd				
	$k_{eff}$	$^{155}\text{Gd}$	$^{157}\text{Gd}$	$^{135}\text{Xe}$	$^{149}\text{Sm}$	$k_{eff}$	$^{155}\text{Gd}$	$^{157}\text{Gd}$	$^{135}\text{Xe}$	$^{149}\text{Sm}$
0	1.1309	2.171e-6	2.281e-6	3.012e-9	2.283e-8	1.1576	2.171e-6	2.281e-6	5.102e-9	5.281e-8
1	1.1287	1.946e-6	1.545e-6	3.027e-9	2.297e-8	1.1407	2.031e-6	1.874e-6	5.075e-9	5.275e-8
2	1.1288	1.695e-6	9.261e-7	3.054e-9	2.333e-8	1.1289	1.884e-6	1.489e-6	5.019e-9	5.228e-8
3	1.1300	1.407e-6	4.531e-7	3.069e-9	2.355e-8	1.1187	1.730e-6	1.133e-6	4.960e-9	5.178e-8
4	1.1335	1.073e-6	1.563e-7	3.072e-9	2.361e-8	1.1100	1.566e-6	8.135e-7	4.901e-9	5.121e-8
5	1.1386	7.084e-7	3.205e-8	3.064e-9	2.361e-8	1.1025	1.389e-6	5.394e-7	4.840e-9	5.052e-8
6	1.1427	3.858e-7	5.697e-9	3.051e-9	2.368e-8	1.0963	1.198e-6	3.197e-7	4.776e-9	4.971e-8
7	1.1450	1.713e-7	2.882e-9	3.035e-9	2.381e-8	1.0912	9.917e-7	1.625e-7	4.710e-9	4.882e-8
8	1.1436	6.335e-8	2.444e-9	3.020e-9	2.396e-8	1.0871	7.750e-7	6.889e-8	4.641e-9	4.789e-8
9	1.1377	2.130e-8	2.290e-9	3.008e-9	2.414e-8	1.0835	5.632e-7	2.598e-8	4.571e-9	4.699e-8
10	1.1292	7.616e-9	2.257e-9	2.998e-9	2.433e-8	1.0797	3.775e-7	1.151e-8	4.500e-9	4.618e-8
11	1.1199	3.544e-9	2.270e-9	2.989e-9	2.452e-8	1.0758	2.331e-7	7.647e-9	4.432e-9	4.543e-8
12	1.1106	2.375e-9	2.298e-9	2.979e-9	2.470e-8	1.0714	1.331e-7	6.526e-9	4.365e-9	4.474e-8
13	1.1014	2.045e-9	2.329e-9	2.968e-9	2.485e-8	1.0663	7.124e-8	6.019e-9	4.301e-9	4.410e-8
14	1.0925	1.951e-9	2.360e-9	2.957e-9	2.499e-8	1.0603	3.667e-8	5.722e-9	4.240e-9	4.351e-8
15	1.0837	1.924e-9	2.390e-9	2.944e-9	2.511e-8	1.0537	1.889e-8	5.542e-9	4.182e-9	4.295e-8
20	1.0426	1.904e-9	2.527e-9	2.869e-9	2.546e-8	1.0183	3.220e-9	5.223e-9	3.917e-9	4.048e-8
25	1.0049	1.898e-9	2.651e-9	2.783e-9	2.550e-8	0.9851	2.891e-9	5.067e-9	3.671e-9	3.816e-8
30	0.9699	1.896e-9	2.775e-9	2.690e-9	2.531e-8	0.9545	2.835e-9	4.956e-9	3.443e-9	3.596e-8
35	0.9373	1.899e-9	2.907e-9	2.597e-9	2.499e-8	0.9263	2.794e-9	4.886e-9	3.234e-9	3.393e-8
40	0.9071	1.905e-9	3.051e-9	2.506e-9	2.460e-8	0.9003	2.759e-9	4.858e-9	3.045e-9	3.208e-8



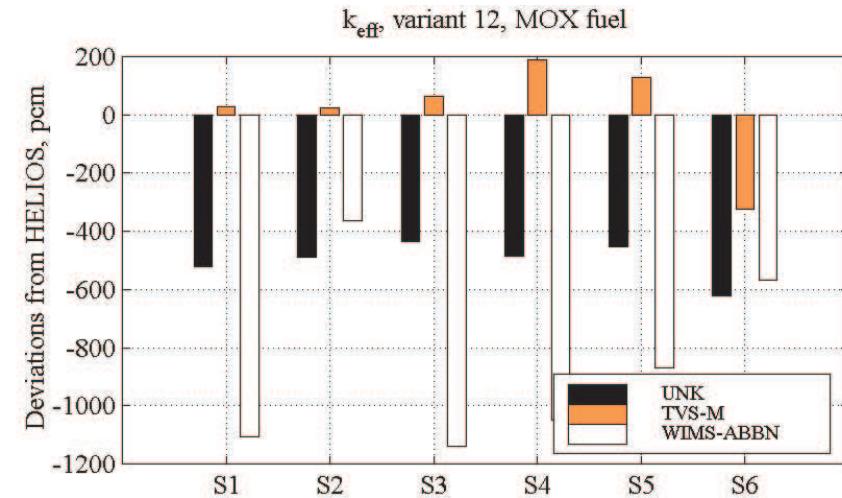
Ячейка V1-урановое топливо



TBC V11-урановое топливо

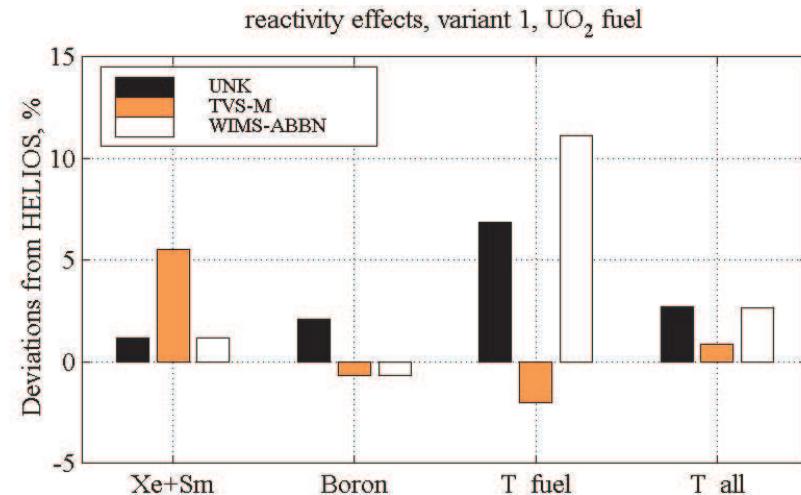


Ячейка V2-MOX топливо

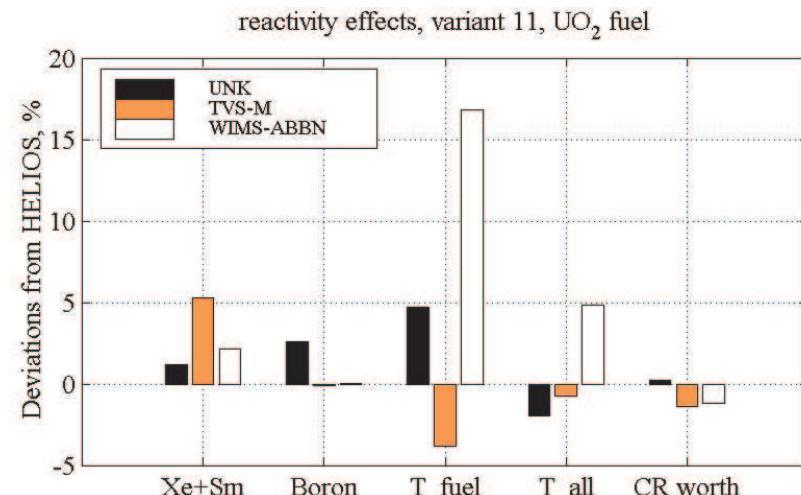


TBC V2-MOX топливо

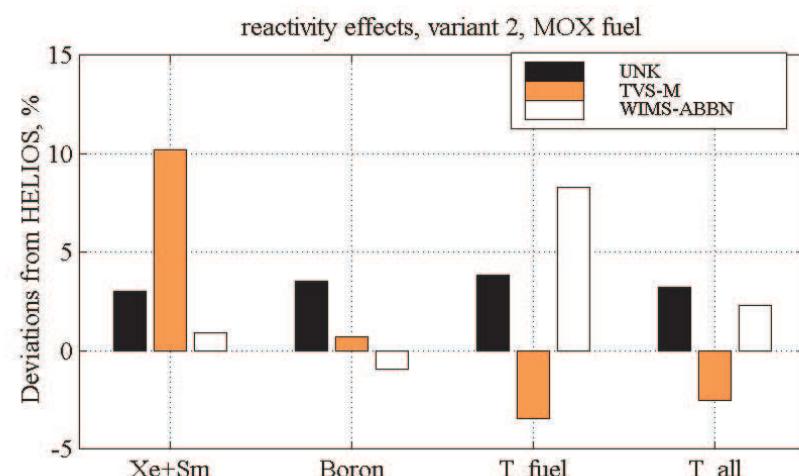
Рис. 1 Отклонения результатов расчета коэффициента размножения тестовых ячеек и ТВС реактора ВВЭР-1000 от результатов по программе HELIOS.



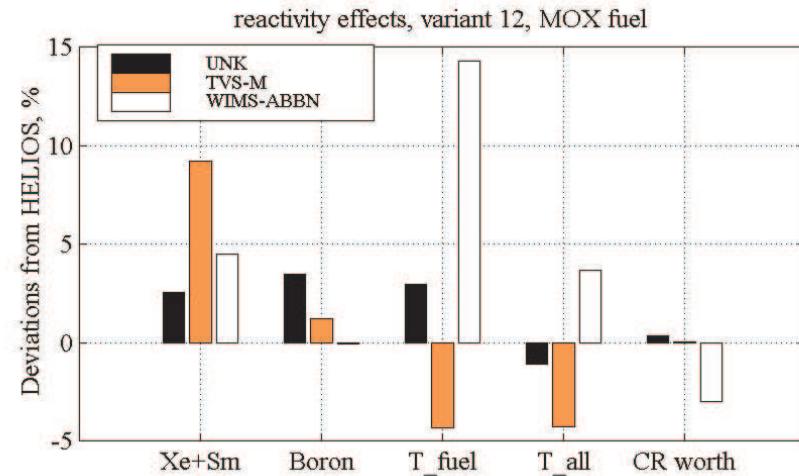
Ячейка V1-урановое топливо



TBC V11-урановое топливо



Ячейка V2-MOX топливо



TBC V2-MOX топливо

Рис. 2 Отклонения результатов расчета эффектов реактивности для тестовых ячеек и ТБС реактора ВВЭР-1000 от результатов по программе HELIOS.

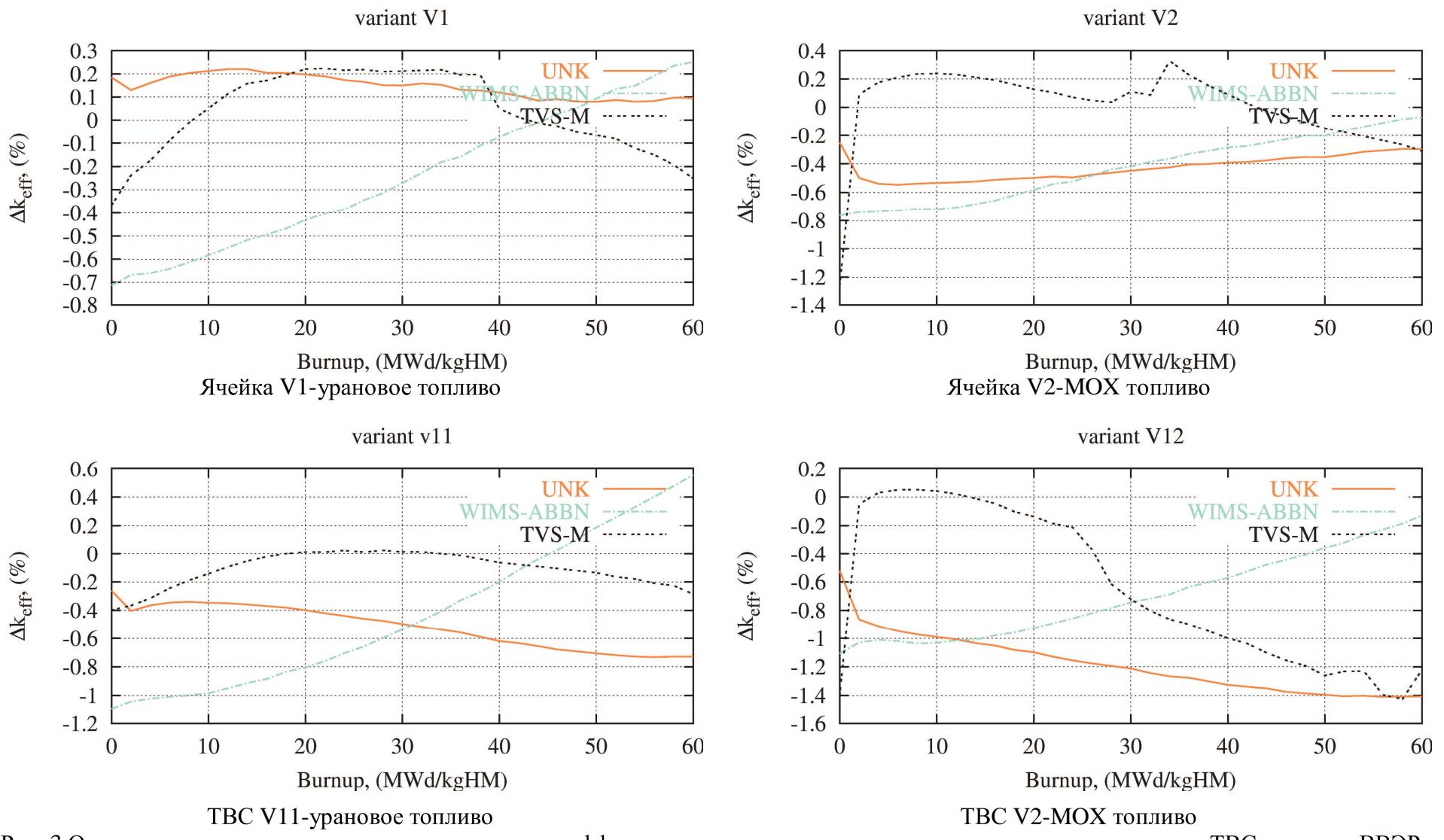
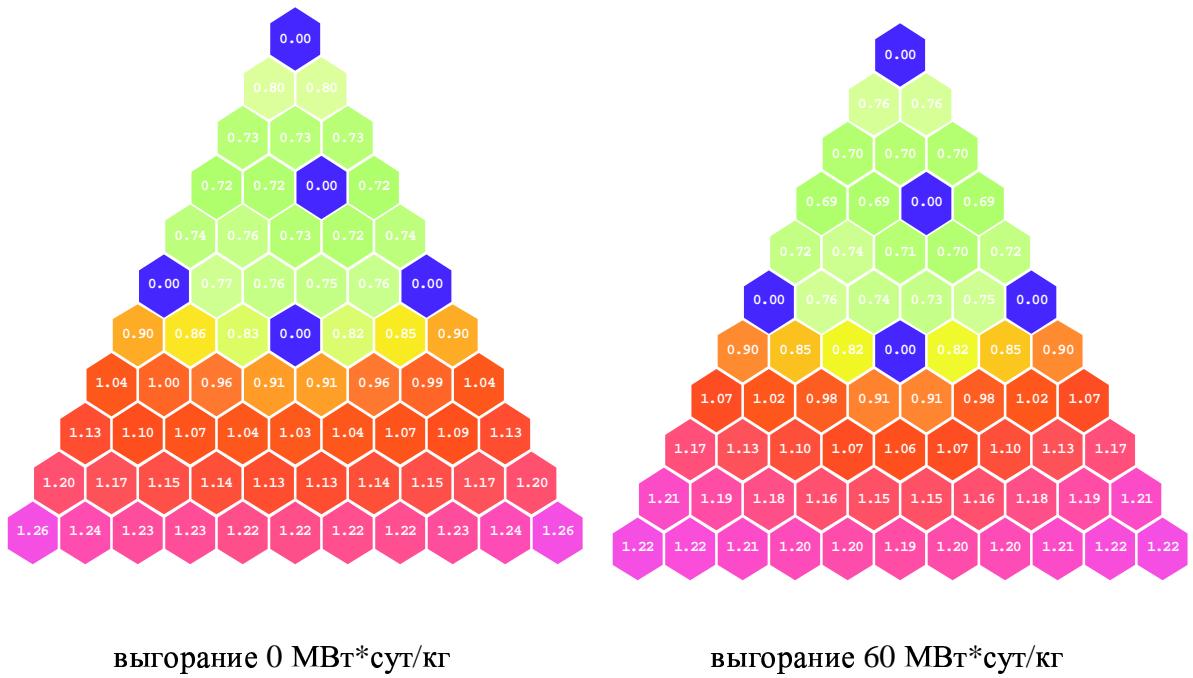
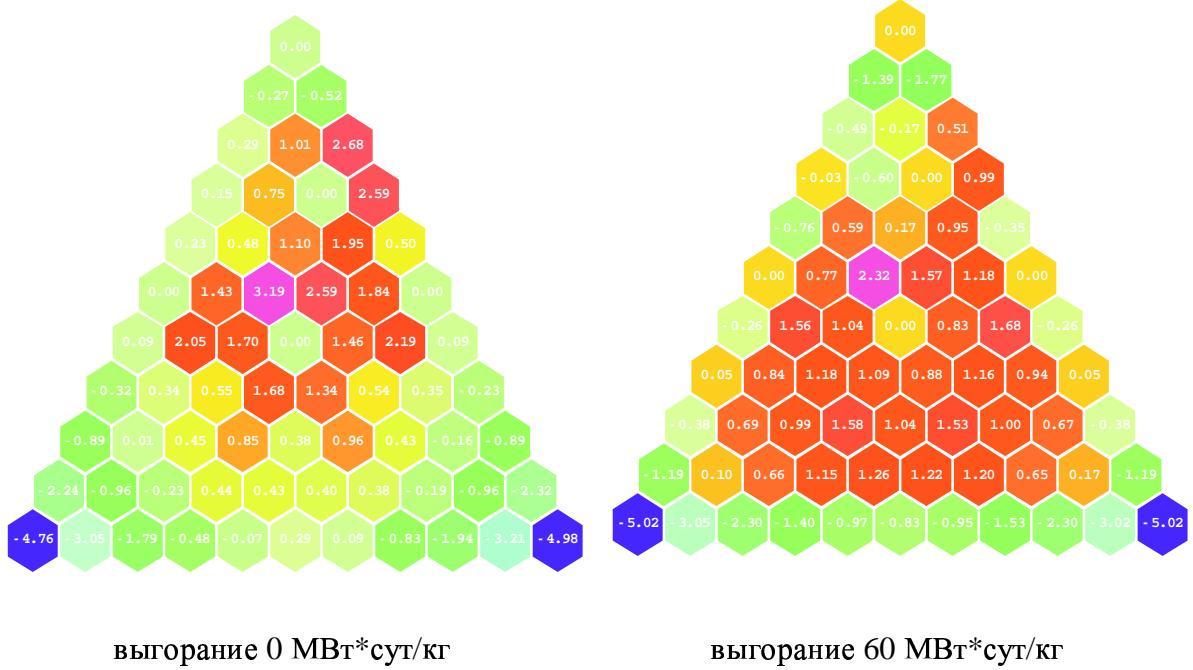


Рис. 3 Отклонения результатов расчета зависимости коэффициента размножения от выгорания для тестовых ячеек и ТВС реактора ВВЭР-1000 от результатов по программе HELIOS.



а) Поле энерговыделения в ТВС (вариант V11S2) рассчитанное по программе UNK



б) Отклонение поля энерговыделения рассчитанного по программе UNK от результатов программы HELIOS

Рис. 4. Сравнение поля энерговыделения в тестовой ТВС реактора ВВЭР-1000 (вариант V11S2) рассчитанного по программам UNK и HELIOS

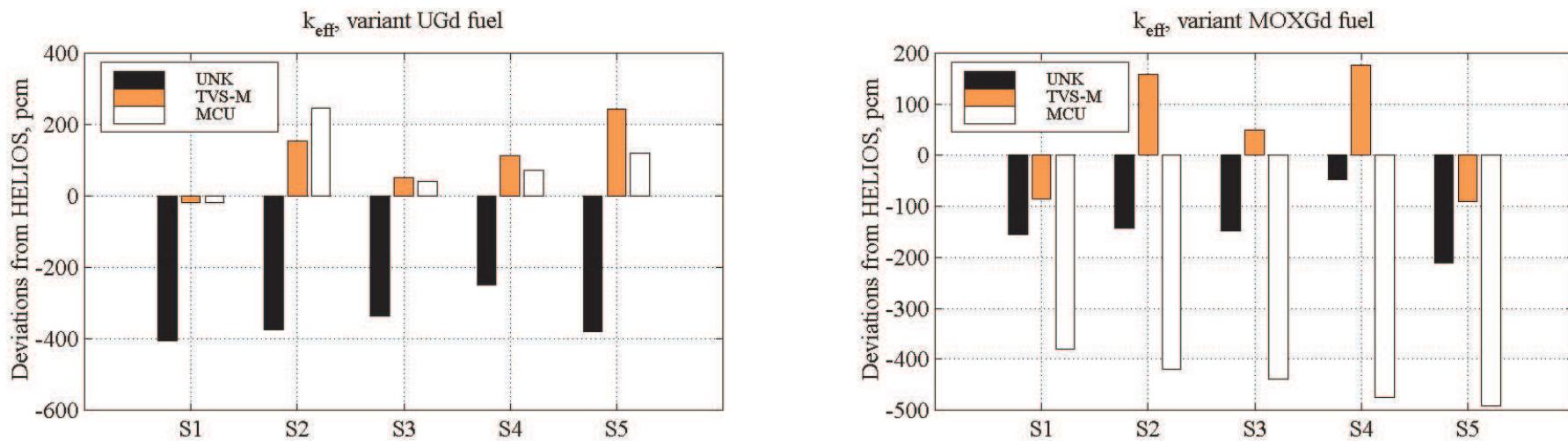


Рис. 5 Отклонения результатов расчета коэффициента размножения тестовых ТВС реактора ВВЭР-1000 с гадолиниевым поглотителем от результатов по программе HELIOS.

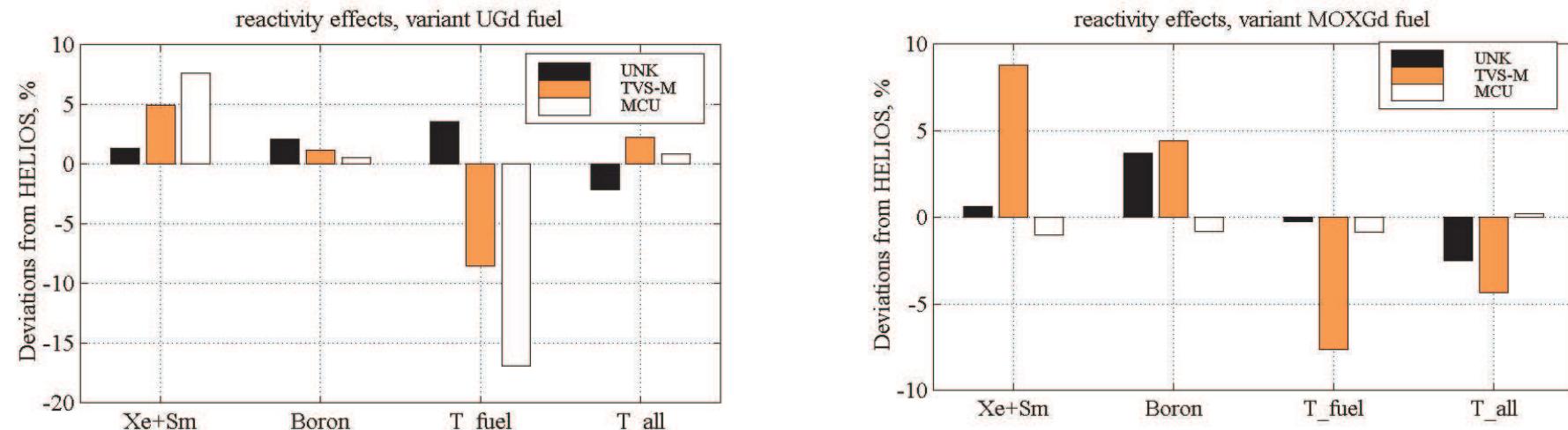


Рис. 6 Отклонения результатов расчета эффектов реактивности для тестовых ТВС реактора ВВЭР-1000 с гадолиниевым поглотителем от результатов по программе HELIOS.

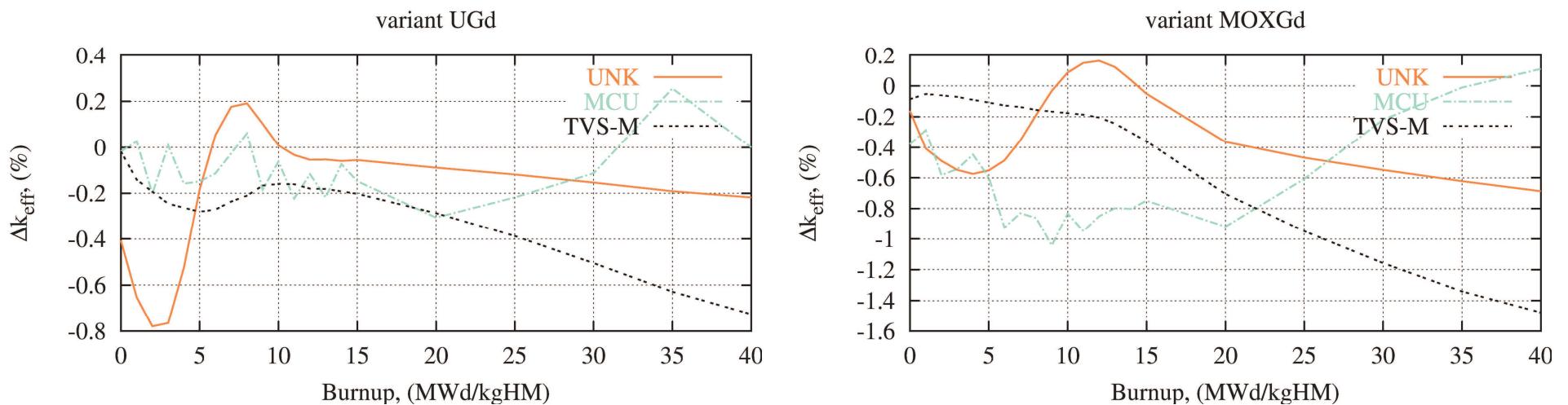


Рис. 7 Отклонения результатов расчета зависимости коэффициента размножения от выгорания для тестовых ТВС реактора ВВЭР-1000 с гадолиниевым поглотителем от результатов по программе HELIOS.

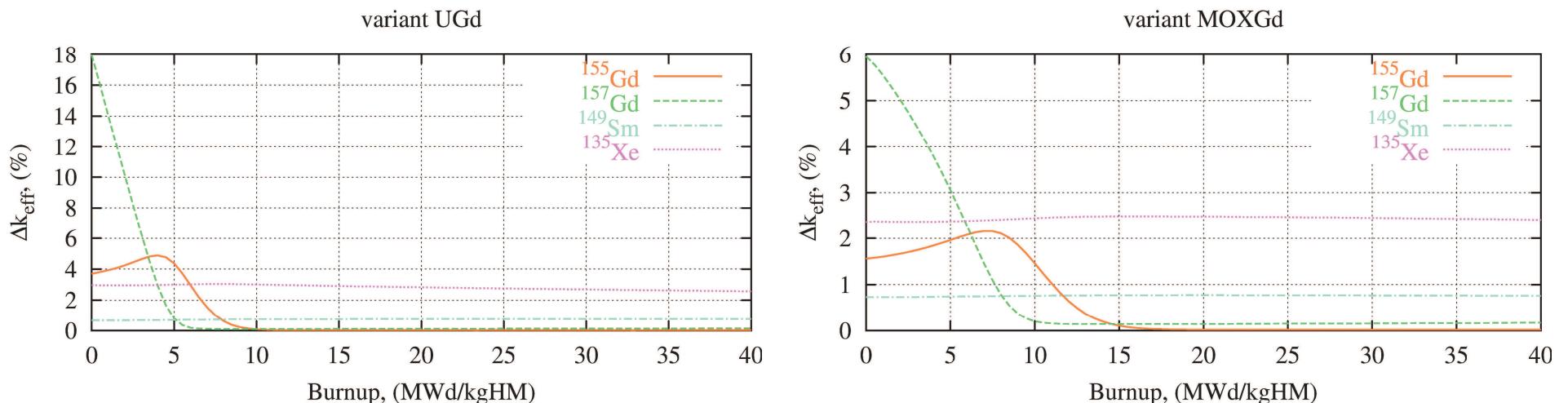


Рис. 8 Влияние на коэффициент размножения ТВС изотопов  $^{155}\text{Gd}$ ,  $^{157}\text{Gd}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{149}\text{Sm}$  в зависимости от выгорания.

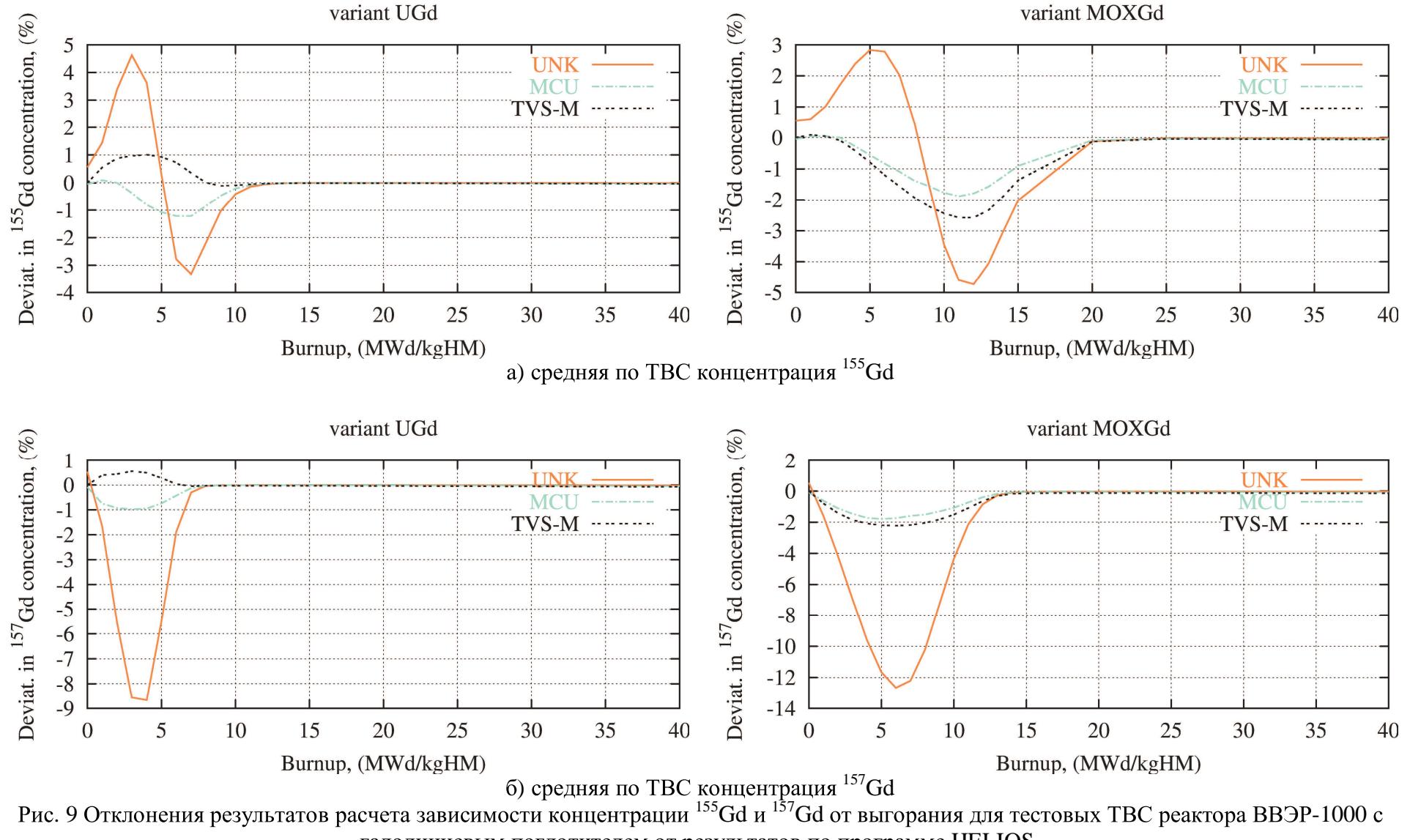


Рис. 9 Отклонения результатов расчета зависимости концентрации  $^{155}\text{Gd}$  и  $^{157}\text{Gd}$  от выгорания для тестовых ТВС реактора ВВЭР-1000 с гадолиниевым поглотителем от результатов по программе HELIOS.

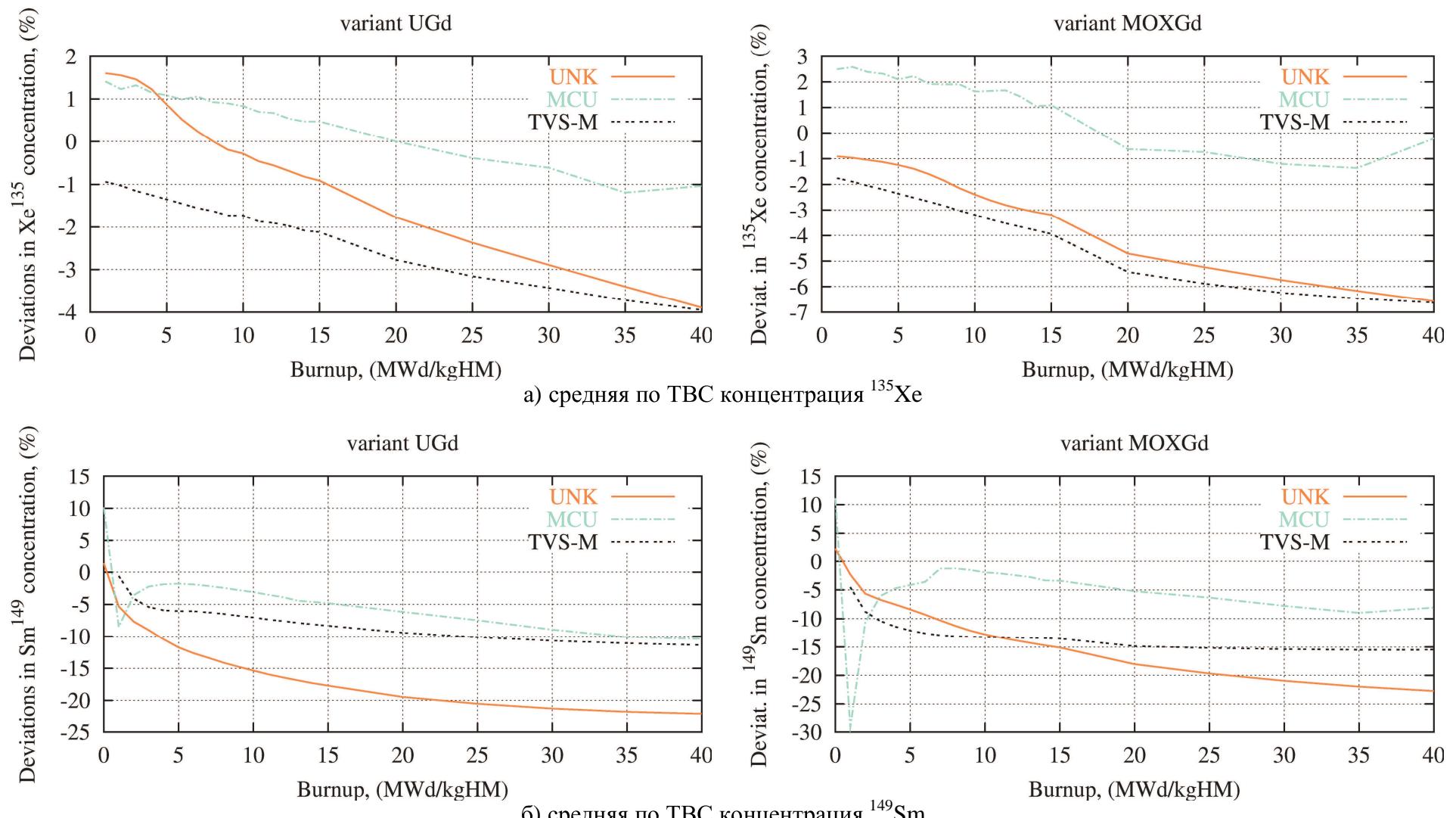
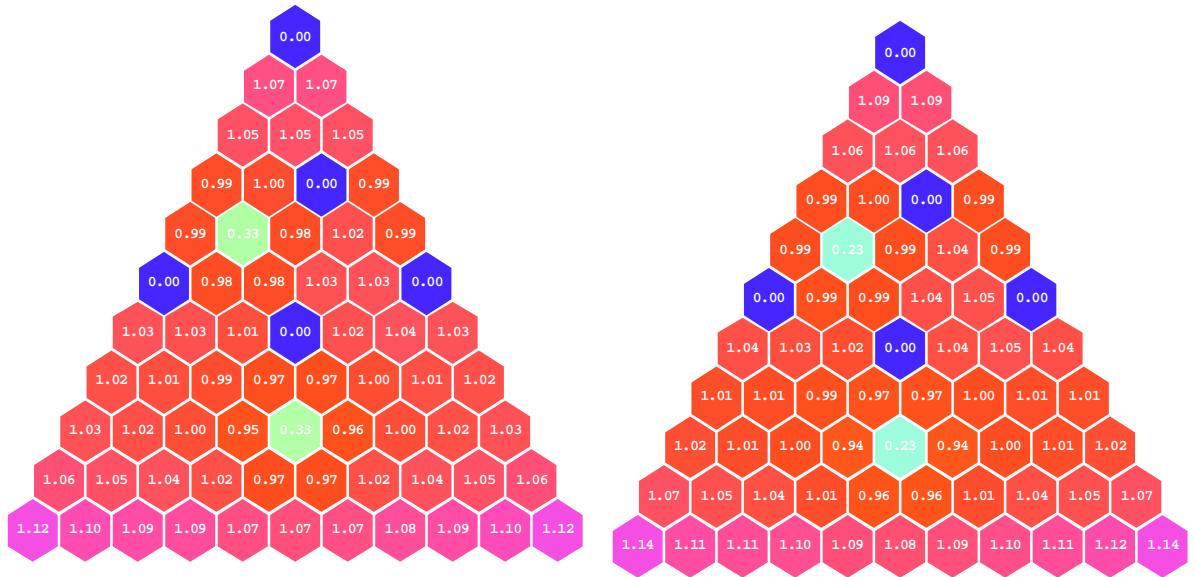


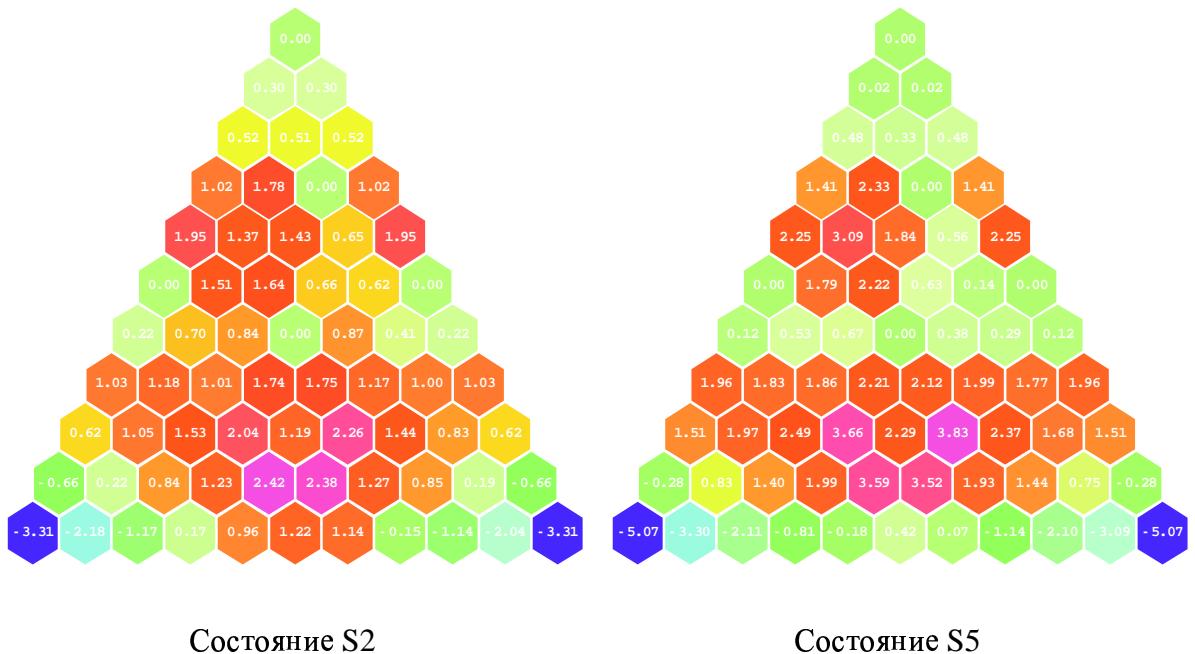
Рис. 10 Отклонения результатов расчета зависимости концентрации  $^{135}\text{Xe}$  и  $^{149}\text{Sm}$  от выгорания для тестовых ТВС реактора ВВЭР-1000 с гадолиниевым поглотителем от результатов по программе HELIOS.



Состояние S2

Состояние S5

а) Поле энерговыделения в ТВС (вариант UGd) рассчитанное по программе UNK



Состояние S2

Состояние S5

б) Отклонение поля энерговыделения (вариант UGd) рассчитанного по программе UNK от результатов программы HELIOS

Рис. 11. Сравнение поля энерговыделения в тестовой ТВС реактора ВВЭР-1000 (вариант UGd) рассчитанного по программам UNK и HELIOS