

УДК 539.125.523.348

РАСЧЕТ ЯДЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПО ПРОГРАММЕ TDMCC НА ПРИМЕРЕ ТУК-137Д

И. А. Барченков, В. И. Кечин, Т. В. Семенова, О. Н. Шукаева

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров

В докладе кратко описана программа TDMCC, представлены основные особенности конструкции транспортного упаковочного комплекта ТУК-137Д и приведено обоснование его ядерной безопасности при помощи программы TDMCC. Значение $K_{\text{эфф}}$ рассчитывалось как для нормальных условий эксплуатации, так и для аварийных условий. Для расчета $K_{\text{эфф}}$ при нормальных условиях эксплуатации рассматривались 4 варианта. Для расчета Коэфф при аварийных ситуациях рассматривались 6 вариантов. В Заключении был сделан вывод, что ТУК-137Д соответствует требованиям правил безопасной перевозки радиоактивных материалов (МАГАТЭ).

Ключевые слова: транспортный упаковочный комплект, расчет ядерной безопасности, программа TDMCC.

Введение

Наша организация имеет более чем пятнадцатилетний опыт по разработке транспортных упаковочных комплектов (ТУК). Каждая такая разработка сопровождается большим количеством расчетов для обоснования ядерной и радиационной безопасности ТУК. В настоящее время для этих целей используется программа TDMCC [1].

TDMCC – программное средство (ПС), разработанное для решения задач по реакторной тематике методом Монте-Карло. Программа позволяет описывать системы с трехмерной геометрией. При описании геометрии систем используется блочный принцип с заданием системы вложений.

В расчетах используются нейтронно-ядерные константы различных версий библиотек ENDF/B. Параллельная версия программы разработана с использованием стандарта MPI [2].

Программа TDMCC аттестована Ростехнадзором для расчетов $K_{\text{эфф}}$. С учетом всех погрешностей $K_{\text{эфф}}$ считается по формуле: $K_{\text{эфф}} = K_{\text{эфф}}^p + \sigma_m + 3\sigma_p$, где $K_{\text{эфф}}^p$ – расчетное значение $K_{\text{эфф}}$, $\sigma_m = 0,6\%$ – методическая погрешность, σ_p – статистическая погрешность.

Согласно нормам НП-053-16 и МАГАТЭ SSR-6 предельно допустимым значением $K_{\text{эфф}}$ для одиночного ТУК считается величина 0,95 [3][4].

Исходные данные ТУК-137Д

Транспортный упаковочный комплект ТУК-137Д [5] предназначен для перевозки отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) реактора ВВЭР-1000.

В качестве исходных данных ТУК-137Д были предоставлены конструкторские чертежи. На их основе были разработаны расчетные модели. Возможности программы TDMCC позволили детально описать конструкцию всех элементов ТУК и загружаемых в него топливных сборок, что показано на рис. 1.

Контейнер представлял собой цилиндрический сосуд, герметично закрывающийся двумя крышками (наружной и внутренней). Внутри полости контейнера была размещена корзина из алюминиевого сплава, в которую в два ряда загружались ТВС.

На предварительном этапе был выбран тип сборок для дальнейшего расчетного анализа ядерной безопасности ТУК-137Д. Основными характеристиками при отборе являлись: 1) полная масса U-235 в ТВС, 2) линейная концентрация U-235 в ТВС, 3) наличие/отсутствие центрального отверстия в топливных таблетках твэла. По результатам расчетно-аналитических оценок была отобрана ТВС реактора ВВЭР-1000, обладающая наибольшей реактивностью – ТВС А-Альфа повышенной ураноемкости (разработка ОАО «ОКБМ Африкантов»). Количество твэлов в ТВС А-Альфа – 312. Обогащение топлива по U-235 – 5 %.

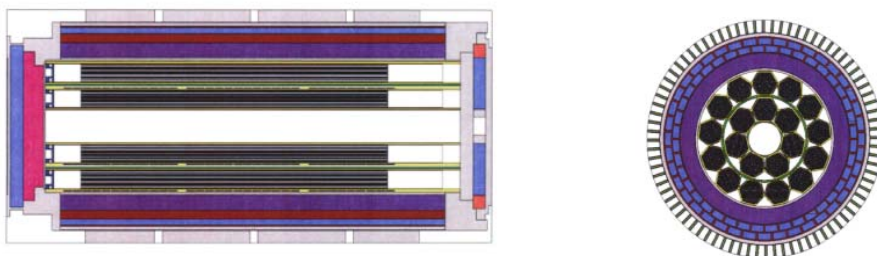


Рис. 1. Общий вид расчетной модели

Расчетный анализ ядерной безопасности ТУК-137Д проводился для случая, когда в контейнер загружалось 20 ТВС с топливом из реактора ВВЭР-1000. При моделировании ТУК были учтены все конструктивные элементы и материалы, которые влияют на увеличение реактивности системы. Для тех элементов, которые не влияют на уровень критичности, были использованы номинальные значения параметров.

Как в нормальных условиях эксплуатации, так и в аварийных условиях, при расчете $K_{эфф}$, ТУК-137Д окружался 20-ти сантиметровым слоем воды.

Расчеты ядерной безопасности ТУК-137Д Расчет $K_{эфф}$ для нормальных условий эксплуатации

Расчеты ядерной безопасности ТУК-137Д в нормальных условиях эксплуатации проводились для исходной геометрии контейнера и его содержимого. Рассмотрим некоторые задачи.

Задача 1. Во внутренней полости ТУК вода полностью отсутствовала. Для отдельной изолированной упаковки значение $K_{эфф}$ составлял: $K_{эфф} = 0,213$

Задача 2. Согласно имеющимся данным, в нормальных условиях эксплуатации после загрузки отработанного (ОЯТ) в ТУК-137Д и последующей осушки допускается наличие остаточной воды во внутреннем объеме контейнера. Для оценки влияния остаточной воды на уровень критичности был проведен расчет $K_{эфф}$ для случая равномерного заполнения полости ТУК-137Д водой/паром с плотностью 10^{-2} г/см³ $K_{эфф} = 0,227$

Задачи 3,4. В постановке задачи 2 был изменен шаг решетки твэлов ТВС с учетом допуска $12,75 \pm 0,3$ мм. (Максимальное расстояние между твэлами при их размещении с равномерным шагом составило 12,98 мм)

Шаг решетки твэлов 12,45 мм – $K_{эфф} = 0,228$,

Шаг решетки твэлов 12,98 мм – $K_{эфф} = 0,227$

Задача 5. Был проведен расчет максимального $K_{эфф}$ для нормальных условий эксплуатации для неограниченного числа упаковок для задачи с шагом решетки твэлов 12,45.

Значение $K_{эфф}$ не изменилось и составило: $K_{эфф} = 0,228$

Расчет $K_{эфф}$ для аварийных ситуаций

Расчеты для обоснования ядерной безопасности ТУК-137Д в аварийных условиях проводились для аварийных ситуаций в случаях бокового и осевого падений. Как в случае вертикального падения ТУК-137Д на крышу, так и в случае падения на дно, топливные таблетки остаются внутри оболочек твэлов, сохраняющих свою целостность. Просыпание топлива в полость ТУК исключалось.

Рассматривались следующие ситуации:

1) заполнение всех свободных объемов ТУК-137Д водой переменной плотности. Отметим, что в полости контейнера отсутствовали замкнутые объемы, которые потенциально могли привести к ситуации частичного затопления ТУК водой.

2) смещение (изгиб) шестигранных алюминиевых труб корзины за счет их локальных пластических деформаций при боковом ударе (изменение межцентрового расстояния между ОТВС).

3) изменение шага и характера размещения твэлов ОТВС в результате воздействия боковых и осевых ударов.

Также учитывалось и совместное влияние этих факторов.

Задача 6. Оценка влияния плотности замедлителя в контейнере на значение $K_{эфф}$. Все свободные полости заполнялись водой с плотностью $0,01 - 1 \text{ г/см}^3$.

Программа TDMCC позволяет проводить расчеты с вариацией плотности. Числа, приведенные в табл. 1, были получены за один расчет в программе.

Таблица 1

Результаты $K_{эфф}$. Задача 6

Плотность воды, г/см^3	0,01	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$K_{эфф}$	0,228	0,421	0,548	0,700	0,814	0,897	0,947

Задачи 7, 8, 9, 10. Оценка уровня подкритичности ТУК-137Д при боковых падениях. В расчетах консервативно не учитывался материал алюминиевого опорного кольца корзины между внутренним и внешним рядом труб. Положение труб и ОТВС внутреннего ряда исходное. Полости контейнера заполнялись водой плотностью 1 г/см^3 .

Задача 7. Все 13 труб внешнего ряда корзины контейнера были сдвинуты к оси максимально близко. Шаг твэлов – исходный. Расчетное значение $K_{эфф}$ приведено в табл. 2 (последний столбец).

Задача 8. Во всех ТВС в задаче 7 варьировался шаг между твэлами. (9,1 мм – минимально возможный, 11 мм и 12,45). Расчетные значения $K_{эфф}$ приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты $K_{эфф}$. Задачи 7, 8

Шаг твэлов, мм	9,1 (min)	11	12,45	12,75 (nom)
$K_{эфф}$	0,610	0,852	0,942	0,948

Задача 9. Для оценки реактивности системы при возможной перегруппировке ОЯТ после боковых падений ТУК была изменена схема размещения твэлов в трубах корзины. Топливные зоны были максимально сближены как в пределах ОТВС, так и в трубах внутреннего и внешнего рядов корзины ТУК-137Д (рис. 2). $K_{эфф} = 0,583$.

Задача 10. Согласно анализу смещения ОТВС ТУК-137Д при падении с высоты 9 м на жесткое основание как на крышу, так и на дно, геометрия контейнера и корзины ТУК оставалась практически исходной. Изменялась геометрия пучка твэлов и направляющих каналов ОТВС.

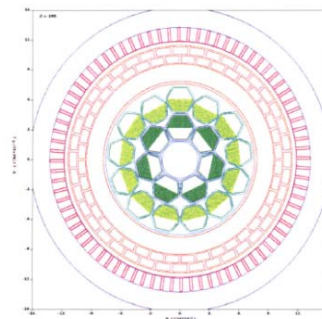


Рис. 2. Разрез расчетной модели ТУК-137Д.
Задача 9

В случае осевого падения ТУК-137Д на крышу ОТВС теряли устойчивость и деформировались волнообразно. Средний шаг между твэлами составляет $\leq 12,75$ мм. Согласно полученной зависимости $K_{эфф}$ от шага между твэлами ОТВС (табл. 2), сближение твэлов вело к снижению $K_{эфф}$.

Из данных о состоянии ОТВС после осевых падений ТУК-137Д на дно были выбраны 3 поперечных сечения в зоне расхождения пучка с увеличенным шагом между твэлами ($> 12,75$): сечения А-А и В-В соответствовали двум нижним дистанционирующим решетками ОТВС, промежуточное состояние Б-Б соответствовало пролету между решетками (рис. 3). В расчетной модели ТВС в зоне расширения пучка высотой 240 мм центры твэлов во всех 20-ти ОТВС были расставлены в соответствии со схемами А-А, Б-Б и В-В. Выше зоны шаг между твэлами – исходный. Расчетные значения $K_{эфф}$ приведены в табл. 3.

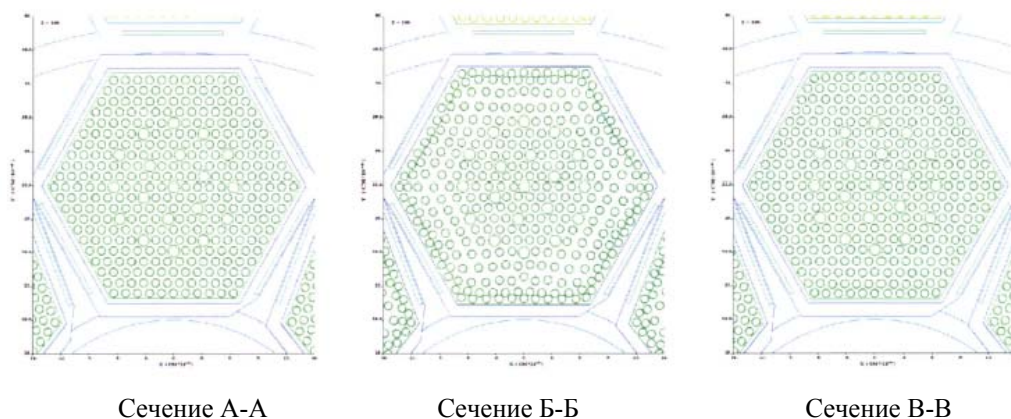


Рис. 3. Поперечные разрезы расчетных моделей ОТВС ВВЭР-1000. Осевое падение на дно. Схема расположений твэлов в зоне расхождения пучка. Задача 10

Таблица 3

Результаты $K_{эфф}$. Задача 10

Шаг/схема расстановки твэлов	12,75	А-А	Б-Б	В-В
$K_{эфф}$	0,947	0,947	0,949	0,947

Задача 11. Полученное в расчетах ядерной безопасности максимальное значение $K_{эфф}$ единичной упаковки в аварийных условиях составило 0,949. Был проведен расчет $K_{эфф}$ для неограниченной группы контейнеров. Значение $K_{эфф}$ не изменилось и составило (со всеми погрешностями): $K_{эфф} = 0,949$.

Заключение

При загрузке в ТУК-137Д 20-ти ТВС со свежим топливом реактора ВВЭР-1000 (консервативная оценка) оцененные сверху значения $K_{эфф}$ с учетом статистической $\sigma_p = 0,02\%$ и методической погрешности расчетов $\sigma_m = 0,6\%$ не превышали значения 0,95 и составили:

- в нормальных условиях эксплуатации – $K_{эфф} = 0,228$;
- в аварийных ситуациях – $K_{эфф} = 0,949$.

Согласно результатам проведенных расчетов, транспортный упаковочный комплект ТУК-137Д обеспечивает выполнение требований «Правил безопасной перевозки радиоактивных материалов» SSR-6 (МАГАТЭ) по ядерной и радиационной безопасности как в нормальных, так и аварийных условиях перевозки.

Литература

1. Свидетельство о государственной регистрации № 2010614412. Программа TDMCC (Time Dependent Monte Carlo Code) / Житник А. К., Рослов В. И., Семенова Т. В. и др.; ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ».
2. Cross Section Evaluation Working Group Benchmark Specification. Cross Section Evaluation Working Group Thermal Reactor Benchmark Compilation, BNL 19302 (ENDF-202), June 1974.
3. Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов. НП-053-16. – Москва, 2016
4. Правила безопасности перевозки радиоактивных материалов. № TS-R-1. Конкретные требования безопасности. – Вена, МАГАТЭ, Издание 2012 года.
5. Котов Л. Н., Леонтьев С. В. Транспортные упаковочные комплекты для транспортирования и временного хранения ОТВС. Выставка «АТОМЭКСПО», – Москва, 19 – 21 июня 2017.

NUCLEAR SAFETY ANALYSIS OF TUK-137D USING THE TDMCC CODE

I. A. Barchenkov, V. I. Kechin, T. V. Semenova, O. N. Shukaeva

Russian Federal Nuclear Center –
All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov

The paper provides a brief description of the TDMCC code and main design features of the TUK-137D package and presents a nuclear safety analysis of the package using the code. The value of K_{eff} was calculated for both normal and accident conditions of operation. Four cases were considered to calculate K_{eff} for normal conditions, and six cases, for accident conditions. A conclusion was drawn that TUK-137D meets the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material.

Key words: package, nuclear safety analysis, TDMCC code.

УДК 519.6:533.7

МОДУЛЬ НАСЫЩЕННО-НЕНАСЫЩЕННОЙ И НАПОРНО-БЕЗНАПОРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В КОМПЛЕКСЕ ПРОГРАММ «НИМФА»

А. Н. Бахаев, В. В. Горев, М. Л. Сидоров, П. А. Машенькин

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров

Доклад посвящен результатам очередного этапа работ по развитию функциональных возможностей комплекса программ НИМФА в части программной реализации модуля насыщенно-ненасыщенной и напорно-безнапорной фильтрации.

На практике большой класс течений подземных вод плохо описывается моделью напорной фильтрации (образование депрессионных воронок вблизи карьеров и откачивающих скважин,