

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
АО «ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РФ —
ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени А. И. Лейпунского»

ФЭИ-3278

**И. Р. Суслов, Е. В. Девкина,
И. А. Лямцев, В. А. Чернов**

**Двухмерная тестовая модель защиты ТУК
для отработавшего ядерного топлива**

Обнинск 2017

УДК 621.039.51+621.039.7

И. Р. Суслов, Е. В. Девкина, И. А. Лямцев, В. А. Чернов

Двухмерная тестовая модель защиты ТУК для отработавшего ядерного топлива : Препринт ФЭИ-3278. Обнинск : ГНЦ РФ-ФЭИ, 2017. — 17 с.

Настоящий препринт посвящён вычислительному бенчмарку для совершенствования методов расчёта радиационной защиты в части расчетов защиты транспортных упаковочных контейнеров (ТУК) для отработавшего ядерного топлива.

This work is devoted to a computational benchmark for the improvement of methods for computing of radiation shielding in part of the calculation of transport containers for spent fuel.

ВВЕДЕНИЕ

Защита транспортных упаковочных контейнеров (ТУК) должна обеспечивать необходимое ослабление потоков нейтронов и гамма-квантов. При этом необходимо, чтобы защита имела минимальный вес и (или) габариты. При проектировании защиты реактора приходится иметь дело со сложной картиной прохождения гамма-квантов и нейтронов. Расчёт полей нейтронов и гамма-квантов — одна из основных проблем, возникающая при проектировании защиты.

Для расчёта защиты ТУК используются программы, в которых применяются расчётные методы решения уравнения переноса. Они делятся на две группы: прямой метод решения уравнения переноса (распространение получил метод дискретных ординат) и метод Монте-Карло [1].

ЯЭУ — мощные источники излучения и, чтобы защита соответствовала техническим требованиям, необходимо ослаблять потоки частиц на несколько порядков. Это так называемые задачи глубокого прохождения частиц. Для задач глубокого прохождения частиц использование метода Монте-Карло затруднительно из-за медленной сходимости задачи. В этом случае в расчётах приходится применять методы понижения дисперсии. При применении метода дискретных ординат для этого класса задач приходится задавать подробное пространственно-энергетическое разбиение, и ресурсов ЭВМ может не хватить для расчёта. Задача будет либо медленно сходиться, либо совсем не будет считаться. В такой ситуации применяются дополнительные математические методы ускорения сходимости итераций.

Для верификации расчётных методов применяются результаты расчётов тестовых моделей реакторов. Результаты расчётов тестовых моделей помогают решить проблемы, возникающие при расчёте защиты. Разработчики программ (расчётных методов) и констант получают возможность оценить в реальном масштабе погрешности, к которым приводит использование созданных ими расчётных методов, систем констант, и определить направление развития этих методов. Расчётчики с помощью бенчмарков могут выбрать более эффективные расчётные методы, позволяющие проводить серийные расчёты с заданной точностью. Экспериментаторам тестовые модели помогают оценить погрешность измерений, выбрать наиболее подходящие средства измерений и спланировать дальнейшие эксперименты. Результаты анализа тестовых моделей могут быть перенесены на реальные конструкции защиты, являющимися прототипами моделей [2].

К настоящему времени создано много международных и российских систем бенчмарков, ниже перечисляются некоторые из них.

База данных бенчмарков SINBAD [3, 4] включает в себя около 100 защитных экспериментальных бенчмарков. Они делятся на три группы: бенчмарки для реакторной защиты, для защиты зоны воспроизводства и для защиты ускорителей.

Еще один известный международный бенчмарк — VENUS-2. Он был создан для верификации расчётов систем с MOX-топливом. В нём рассматривается двух-

и трёхмерная геометрия. В качестве экспериментальной базы исследований были взяты эксперименты, проведённые на реакторе нулевой мощности (критсборке) VENUS-2. Активная зона реактора содержит 12 квадратных (15×15 твэлов) тепло-выделяющих сборок (ТВС). В центральную область активной зоны загружены ТВС с урановым топливом, на периферии — с МОХ-топливом. Экспериментальные данные VENUS-2 включают результаты измерений аксиальной утечки и по-твэльного распределения поля деления и некоторых важных скоростей реакций, а также полное детальное описание геометрии и состава сборки [5, 6].

Можно отметить канадскую систему тестовых моделей, использующуюся для верификации детерминистического кода Attila. Результаты расчётов бенчмарков по программе Attila сравниваются с результатами расчётов по программе MCNP [7]. В этой системе бенчмарков рассматриваются источники нейтронов и гамма-квантов как от работающих ЯЭУ, так и источники нейтронов и гамма-квантов от отработавшего топлива.

Из выше сказанного можно сделать вывод, что в большинстве тестовых моделей анализируются работающие ЯЭУ, а не отработавшее реакторное топливо, и бенчмарков, в которых рассматриваются источники гамма-квантов, значительно меньше, чем бенчмарков с источниками нейтронов.

При выводе из эксплуатации ЯЭУ, выгрузке активной зоны, дальнейшей переработке и утилизации ядерных отходов необходимо учитывать не только нейтронные источники от отработавшего топлива, но и источники гамма-квантов, которые вносят существенный вклад в формирование дозы. Источниками гамма-квантов в реакторах являются продукты деления топлива, наведённая активность в конструкционных материалах, активация теплоносителя.

В настоящей работе предлагается новый бенчмарк, в котором отражаются особенности российской практики работы с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ), в частности для реакторов с теплоносителем свинец-висмут. Авторы считают, что предложенная тестовая модель будет полезной для развития методов обоснования радиационной безопасности с ОЯТ реакторов малой энергетики.

Краткое описание реакторов с ЖМТ и проблемы обращения с ОЯТ

В период 1962—1990 гг. в составе ВМФ России эксплуатировались атомные подводные лодки (АПЛ) с жидкометаллическим теплоносителем (ЖМТ) свинец-висмут в первом контуре реакторной установки [8]. Реакторы этих АПЛ были разработаны под научным руководством ГНЦ РФ ФЭИ и относились к типу реакторов на промежуточных нейтронах.

В отличие от водо-водяных реакторов загрузка-выгрузка активных зон реакторов АПЛ с ЖМТ и их последующее хранение осуществляются в форме единой отработавшей выемной части (ОВЧ), включающей в себя активную зону с погружёнными в неё стержнями СУЗ, верхнюю пробку биологической защиты и для двух реакторов боковой бериллиевый отражатель.

Работа реакторной установки АПЛ на энергетических уровнях мощности сопровождалась образованием и накоплением радиоактивности в активной зоне, стержнях СУЗ, в близлежащих конструкциях и в теплоносителе долгоживущей радиоактивности. В настоящее время эти АПЛ выведены из эксплуатации, и ОВЧ реакторов находятся в хранилищах п. Гремиха. В 2013 году начаты работы по разборке ОВЧ с последующей транспортировкой отработавшего ядерного топлива во ФГУП «Атомфлот» для временного хранения и далее во ФГУП «Маяк» для переработки. ОВЧ реакторов АПЛ с ЖМТ являются источниками интенсивного нейтронного и гамма-излучения. Активность ОВЧ зависит от энерговыработки конкретного реактора.

Одной из основных задач, решаемых при обращении с ОВЧ и ОЯТ в п. Гремиха, является оценка радиационного воздействия на персонал при проведении работ по выгрузке ОВЧ из реактора, разборке ОВЧ и транспортировке ОЯТ к месту переработки в условиях нормальной эксплуатации и в аварийных ситуациях. Для хранения и транспортировки ОВЧ используются транспортно-упаковочные контейнеры. В препринте рассматривается упрощённая расчётная модель ОВЧ в транспортно-упаковочном контейнере с радиационной защитой [9].

Предложенный бенчмарк относится к категории расчётных тестов и имеет реальный реакторный прототип. Для этого типа тестов концентрации ядерных нуклидов приближённо отражают реальные составы. Некоторые другие характеристики также могут быть упрощены по сравнению с прототипом. Особенностью нейтронно-физических реакторных тестов этого типа является достаточно большая свобода при подготовке констант (расчёта макро- и микросечений). Из-за этого результаты могут иметь достаточно большие расхождения при использовании разных систем подготовки сечений [10].

В рассматриваемом бенчмарке вычисляются поля гамма-квантов для контейнера с отработавшим ядерным топливом. Конструкция контейнера должна обеспечивать уровень доз на поверхности, соответствующий нормам радиационной безопасности [11] и требованиям к транспортированию радиоактивных материалов [12], что определяется спектром излучения (изотопным составом) и интенсивностью источника. Параметры источника зависят от начального состава топлива, выгорания топлива, энерговыработки реактора и времени выдержки.

В предложенной тестовой модели учитывались следующие требования

1. Тестовая модель должна являться обобщённым представлением определённого класса задач.
2. Геометрия тестовой модели должна быть простой.
3. Характеристики модельного источника излучения должны отражать основные особенности реактора.
4. Прототипом модели должны быть защитные композиции проектируемых или уже вошедших в эксплуатацию реакторов. При этом должна быть передана структура защиты, отражающая функциональное назначение отдельных слоёв, и

представлены основные защитные материалы. Для усиления определённых эффектов переноса излучения, толщины некоторых слоёв могут быть увеличены. Конструкционные особенности защиты, не оказывающие заметного влияния на распределение потоков излучения, не должны включаться в модель.

5. Должны быть однозначно описаны детекторы, представляющие интерес для проектировщиков [2].

БЕНЧМАРК

Геометрия и материальный состав

Геометрия бенчмарка задаётся цилиндрами, оси которых лежат на оси z (рис. 1). Топливная зона гомогенизирована (отображена черным цветом на рисунке 1). Источник располагается в топливной зоне, там же размещены в виде колец органы регулирования (ОР). Центральный ОР задан в виде стержня (рис. 2). Размеры на рисунках указаны в сантиметрах.

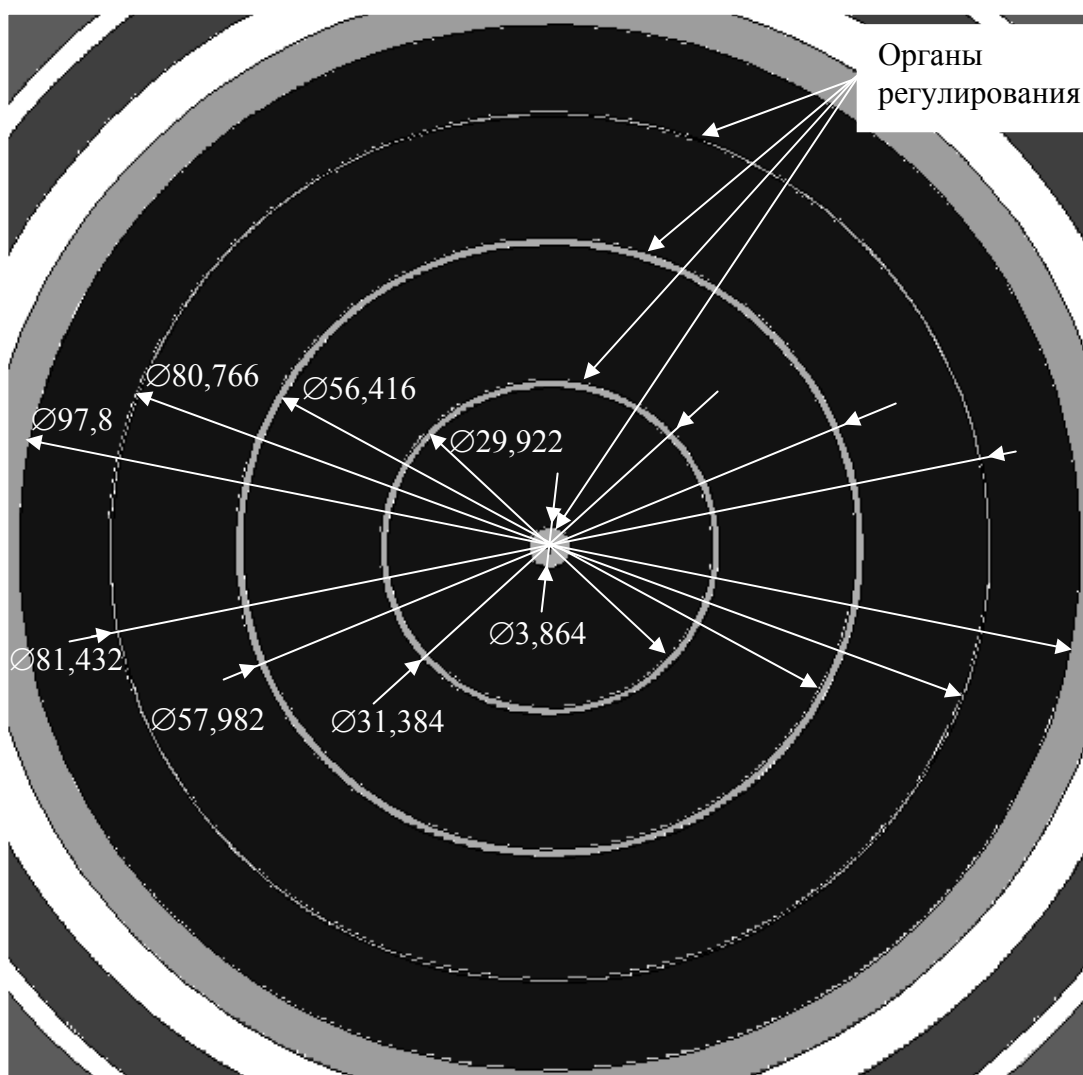


Рис. 1. Поперечное сечение активной зоны

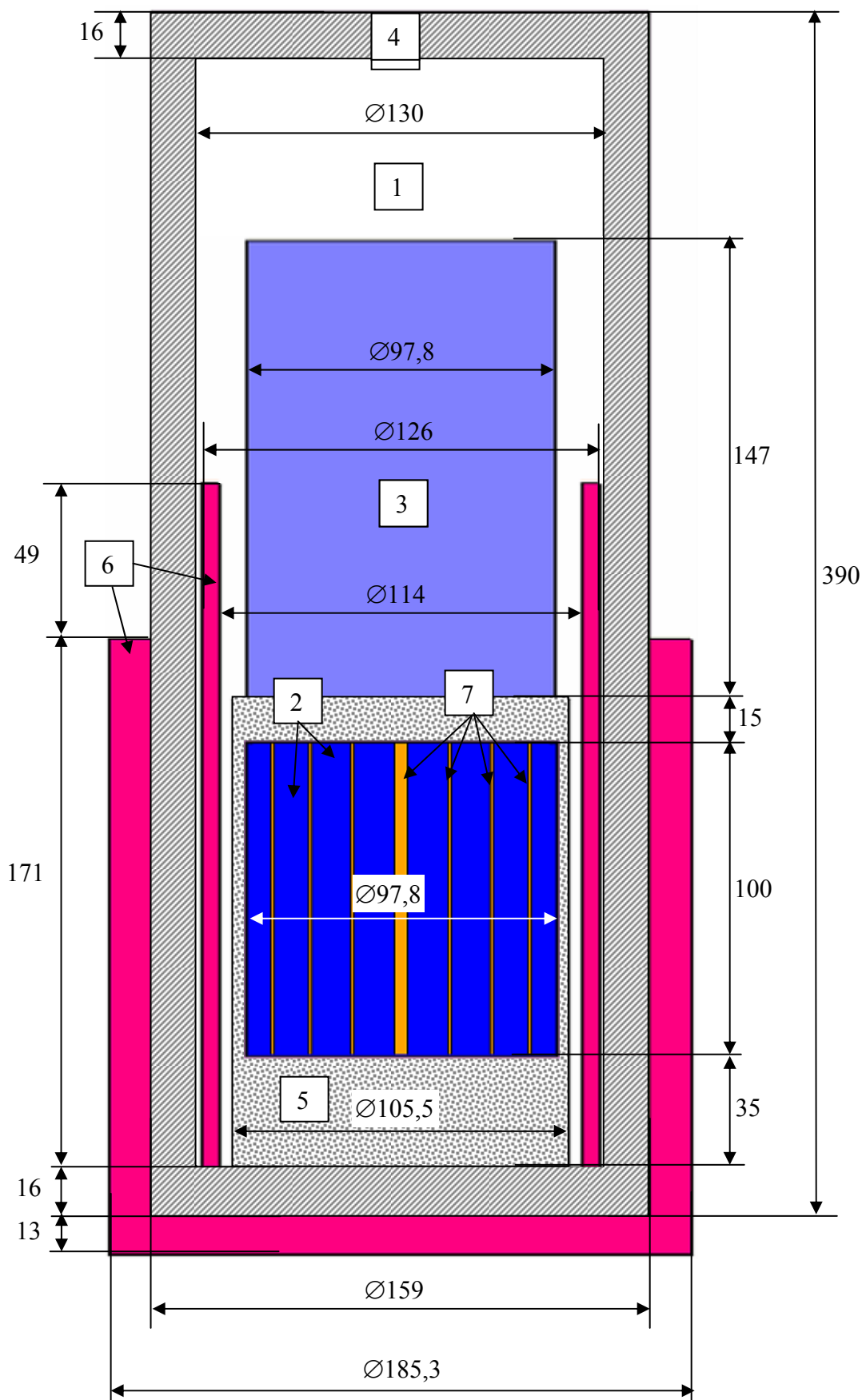


Рис. 2. Геометрия и материальный состав бенчмарка.
Цифры в квадратах соответствуют номеру материала в таблице 1

В таблице 1 для каждого материала приведены ядерные концентрации ($\times 10^{24}$ атом/см³). Для каждого нуклида дана его ядерная доля в материале.

Таблица 1. Изотопный состав материалов

1 воздух						$\rho=5,38000E-05$	
O	2,00E-01	N	8,00E-01				
2 топливо						$\rho=7,96479E-02$	
Be	7,54E-01	U235	8,55E-03	U238	1,06E-03	Na	8,49E-03
C	6,14E-04	Na	5,69E-03	N	3,68E-03	P	5,71E-05
S	3,68E-05	Cr50	6,41E-04	Cr52	1,24E-02	Cr53	1,40E-03
Cr54	3,49E-04	Mn	6,44E-04	Fe54	5,10E-03	Fe56	8,00E-02
Fe57	1,85E-03	Fe58	2,46E-04	Ni58	2,05E-04	Ni60	7,90E-05
Ni61	3,44E-06	Ni62	1,10E-05	Ni64	2,79E-06	Mo	9,84E-04
Pb206	1,30E-02	Pb207	1,13E-02	Pb208	2,67E-02	Bi209	6,30E-02
3 бетон						$\rho=8,14945E-02$	
H	1,54E-01	O	5,45E-01	Al	2,69E-02	N	1,82E-01
S	7,73E-04	Ca	2,90E-02	Fe54	3,62E-04	Fe56	5,49E-03
Fe57	1,25E-04	Fe58	1,63E-05	Mg	1,06E-02	B10	7,89E-03
B11	2,87E-02	C	9,58E-03				
4 сталь 20						$\rho=8,69211E-02$	
C	6,92E-03	Mn	1,36E-02	N	6,91E-03	P	1,79E-04
S	1,39E-04	Cr50	1,45E-04	Cr52	2,68E-03	Cr53	2,98E-04
Cr54	7,29E-05	Ni58	1,30E-02	Ni60	4,85E-03	Ni61	2,07E-04
Ni62	6,52E-04	Ni64	1,61E-04	Cu63	2,44E-03	Cu65	1,05E-03
Mo	6,94E-04	Nb93	1,19E-04	Fe54	5,72E-02	Fe56	8,66E-01
Fe57	1,97E-02	Fe58	2,57E-03				
5 теплоноситель						$\rho=3,08910E-02$	
Pb206	1,14E-01	Pb207	9,88E-02	Pb208	2,34E-01	Bi209	5,53E-01
6 БНС-4						$\rho=1,15450E-01$	
H	6,21E-01	C	3,13E-01	B10	6,25E-03	B11	2,27E-02
N	3,72E-02						
7 ОР							
Eu151	2,36E-02	Eu153	2,57E-02	B10	2,27E-01	B11	5,67E-02
Cr50	3,24E-03	Cr52	6,25E-02	Cr53	7,08E-03	Cr54	1,76E-03
C	1,13E-02	Pb206	2,70E-02	Pb207	2,34E-02	Pb208	5,56E-02
Bi209	1,31E-01	Fe54	1,69E-02	Fe56	2,65E-01	Fe57	6,13E-03
Fe58	8,15E-04	Ni58	2,02E-02	Ni60	7,77E-03	Ni61	3,38E-04
Ni62	1,08E-03	Ni64	2,74E-04	Mo	4,71E-04	Mn	3,09E-04
Nb	2,07E-03	Si	2,23E-02	S	1,76E-05	P	2,74E-05

Источники

Источник гамма-квантов интенсивностью 1 гамма-квант/с расположен в топливной зоне и по размерам совпадает с ней. Он равномерно распределён по объёму топливной зоны. Спектр источника имеет групповое распределение (табл. 2).

Таблица 2. Энергетическое распределение источников гамма-квантов

Е, МэВ	Доля
0,04 – 0,08	3,55E-4
0,08 – 0,15	6,33E-4
0,15 – 0,35	1,52E-4
0,35 – 0,75	6,11E-1
0,75 – 1,25	1,94E-1
1,25 – 1,75	1,94E-1
1,75 – 2,5	1,40E-6

Точки детектирования

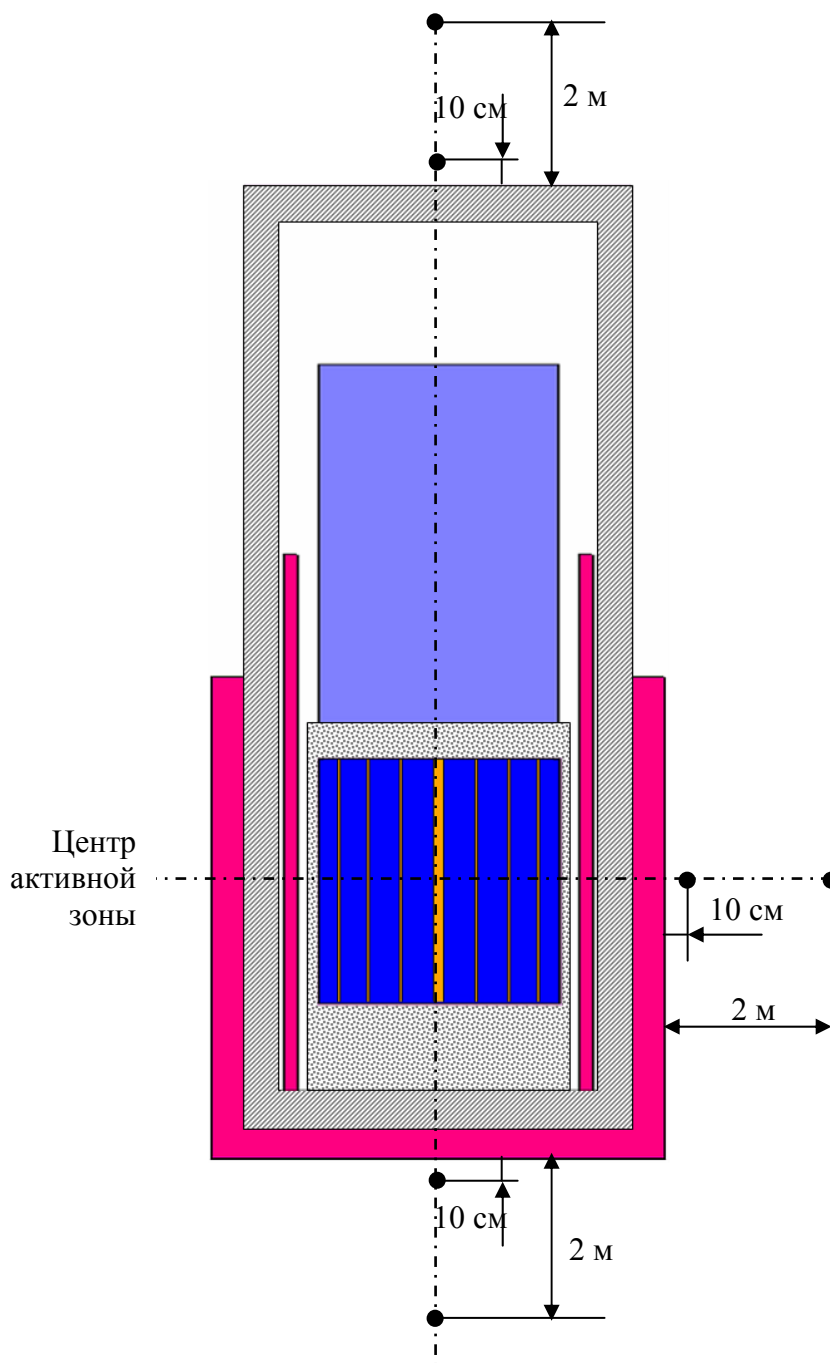


Рис. 3. Схема расположения точек детектирования

Мощности доз излучения рассчитывались в точках детектирования (рис. 2). В соответствии с требованиями НП-053-16 для транспортировки ядерных материалов, мощности доз излучения не должны превышать 2 мЗв/ч на поверхности контейнера и 0,1 мЗв/ч на расстоянии 2 м от поверхности контейнера. В бенчмарке точки детектирования выбирались так, чтобы оценить максимальную мощность дозы на расстояниях от поверхности защиты контейнера, которые приводятся в нормах ядерной безопасности. Они расположены напротив центра активной зоны на расстоянии 10 см и 2 метров и напротив центров нижней и верхней поверхностей на расстоянии 10 см и 2 м [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В препринте представлена двухмерная тестовая расчётная модель контейнера с отработавшим топливом.

Предложенная расчётная тестовая модель является задачей глубокого прохождение частиц. При её расчёте по методу Монте-Карло требуется применять дополнительные математические методы понижения дисперсии.

Приведены данные для расчёта бенчмарка по программам MCNP и TWO-DANT

Список литературы

1. Защита от ионизирующих излучений: В 2 т. Т. 1. Физические основы защиты от излучений: Учебник для вузов / Н.Г. Гусев, В.А. Климанов, В.П. Машкович, А.П. Суворов ; Под ред. Н.Г. Гусева. — 3-е изд., М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Савицкий, В.И. Одномерные тестовые модели защиты быстрых энергетических реакторов: Препринт № 1290. — Обнинск: ГИЦ РФ-ФЭИ, 1982.
3. 20 Years of SINBAD (Shielding Integral Benchmark Archive and Database) / I. Kodelia, A. Milocco, P. Ortego and E. Sartori // Progress in Nuclear Science and Technology. — 2014. — Vol. 4. — Pp. 308–311.
4. Miller P., Nagel P., Salvatores M., Sartori E. Shielding Experimental Benchmark Base at the Nuclear Energy Data Bank / Proc 7th Int. Conf. on Rad. Shielding. — Bournemouth, UK (1988), NEACRP-L-310.
5. Benchmark on the Three-dimensional ENUS-2 MOX Core Measurements. Final Report. Nuclear Science NEA/NSC/DOC(2003)5.
6. Benchmark on the VENUS-2 MOX core Measurements: Final Report. NEA/NSC/DOC(2000)7.
7. Heterogeneous 3-D SN Transport Reactor Calculations Using Attila / R.P. Rulko, M. Belal, and D.I. Tomasevic // Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications and Monte Carlo 2010 (SNA+MC2010). — Hitotsubashi Memorial Hall, Tokyo, Japan, October 17-21, 2010.

8. Забудько А.Н., Панкратов Д.В., Тошинский Г.И. и др. Проблемы и подходы к обращению с отработавшим ядерным топливом жидкометаллических реакторов атомных подводных лодок // Известия вузов. Ядерная энергетика. — 2007. — № 1. — С. 13–23.
9. Девкина Е.В. Проведение расчётов в обоснование радиационной безопасности при выгрузке и разборке активных зон отработавших выемных частей реакторов с жидкометаллическим теплоносителем АПЛ в п. Гремиха : Тезисы доклада / Е.В. Девкина, А.Н. Николаев, И.Р. Суслов, В.А. Чернов // Сборник тезисов докладов 10-й юбилейной Российской конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях». — Москва-Обнинск, 2015. — С. 137–138.
10. Зизин М. Н. Методы расчёта нейтронно-физических характеристик быстрых реакторов. — М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2014.
11. Нормы радиационной безопасности. НРБ-99/2009.
12. Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов. НП-053-16.

Приложение А. Задание для программы MCNP и блок геометрических данных для программы TWODANT.

Исходные данные для бенчмарка в формате программы MCNP приведены на рисунке А-1, а блок геометрических данных в формате для программы TWODANT на рисунке А-2

```
benchmark
1 0 -1:2:3 imp:n,p=0 $внешний мир
2 1 0.0000538 1 -2 -3 (17:16:-18) #11 imp:n,p=1 $ воздух
вокруг контейнера
3 2 0.079647917 5 -6 -4 22 #13 #14 #15 imp:n,p=1 $ топливо
4 5 0.030891 -4 6 -7 imp:n,p=1 $ теплоноситель
5 3 -2.3 7 -8 -4 imp:n,p=1 $ бетон
6 6 -1. 12 -9 -10 11 imp:n,p=1 $ БНС-4 внутри контейнера
7 5 0.030891 -13 12 -7 (-5:7:4) imp:n,p=1 $ теплоноситель
8 1 0.0000538 -13 7 -8 (-7:8:4) imp:n,p=1 $ воздух внутри
контейнера
9 1 0.0000538 12 -14 -15 (-12:8:13) #6 imp:n,p=1 $ воздух
внутри контейнера
10 4 -8 -17 -16 18 (-12:14:15) imp:n,p=1 $ контейнер
11 6 -1. 19 -20 (16:-18) -21 imp:n,p=1 $ БНС-4 снаружи кон-
тейнера
12 7 0.06129073 -22 5 -6 imp:n,p=1 $ центральный стержень
13 7 0.06129073 -24 23 5 -6 imp:n,p=1 $ центральный стер-
жень
14 7 0.06129073 -26 25 5 -6 imp:n,p=1 $ центральный стер-
жень
15 7 0.06129073 -28 27 5 -6 imp:n,p=1 $ центральный стер-
жень

с -----окружение контейнера
1 pz -300
2 pz 700
3 cz 350
с -----активная зона
4 cz 48.9
5 pz -2.4
6 pz 97.6
с -----
7 pz 112.6
8 pz 259.6
с -----БНС внутри контейнера
9 pz 182.1
10 cz 63.
11 cz 57.
12 pz -37.9
13 cz 52.75
с -----контейнер
14 cz 65.
15 pz 320.1
16 cz 79.5
17 pz 336.1
18 pz -53.9
```

с -----БНС-4 снаружи контейнера

19 pz -66.9

20 cz 92.65

21 pz 133.1

с -----ОР

22 cz 1.932

23 cz 14.961

24 cz 15.692

25 cz 28.208

26 cz 28.991

27 cz 40.383

28 cz 40.716

с =====МАТЕРИАЛЫ=====

с воздух 0.0000538 ($\sim 1.25 \cdot 10^{-3}$) г/см³ = 1,25 кг/м³)

m1 8016.60с 0.00001076

7014.60с 0.00004304

с гомогенное топливо с теплоносителем

m2 4009.66с 0.060049636

92235.50с 0.00068116

92238.66с 8.41883E-05

11023.66с 0.000676464

6000.66с 4.88904E-05

11023.66с 0.000453017

14000.60с 0.000292723

15031.66с 4.5501E-06

16032.66с 2.93067E-06

24050.66с 5.10335E-05

24052.66с 0.000984143

24053.66с 0.000111581

24054.66с 2.77777E-05

25055.66с 5.1307E-05

26054.66с 0.000406005

26056.66с 0.006373403

26057.66с 0.00014719

26058.66с 1.95883E-05

28058.66с 1.63434E-05

28060.66с 6.29541E-06

28061.66с 2.73683E-07

28062.66с 8.74584E-07

28064.66с 2.22307E-07

42000.66с 7.83457E-05

82206.66с 0.001035244

82207.66с 8.97E-04

82208.66с 0.002127329

83209.66с 0.005020183

с серпентениновый бетон+3%карбида бора

m3 1001.66с -0.009118

8016.60с -0.51313

13027.66с -0.042777

14000.60с -0.3007

16032.66с -0.001455

20000.66с -0.068482

	26054.66с	-0.0011509
	26056.66с	-0.0180673
	26057.66с	-0.0004173
	26058.66с	-5.55287E-05
	12000.66с	-0.0151
	5010.66с	-4.65E-03
	5011.66с	-1.86E-02
	6000.66с	-6.77E-03
с контейнер		
m4	6000.66с	-0.0015
	25055.66с	-0.0135
	14000.60с	-0.0035
	15031.66с	-0.0001
	16032.66с	-0.00008
	24050.66с	-0.00013035
	24052.66с	-0.0025137
	24053.66с	-0.000285
	24054.66с	-7.095E-05
	28058.66с	-0.01361417
	28060.66с	-0.005244131
	28061.66с	-0.00022798
	28062.66с	-0.000728536
	28064.66с	-0.000185183
	29063.66с	-0.002766803
	29065.66с	-0.001233197
	42000.66с	-0.0012
	41093.66с	-0.0002
	26054.66с	-0.055680682
	26056.66с	-0.87406689
	26057.66с	-0.020186037
	26058.66с	-0.002686391
с теплоноситель		
m5		
	82206.66с	0.003522006
	82207.66с	0.003052417
	82208.66с	0.007237391
	83209.66с	0.017079171
с ВНС-4		
m6		
	1001.66с	-0.12
	6000.66с	-0.72
	5010.66с	-0.012
	5011.66с	-0.048
	7014.66с	-0.1
с БС-10с80%B10+EU КС		
m7		
	63151.66с	0.001444073
	63153.66с	0.00157635
	5010.66с	0.013908543
	5011.66с	0.003477266
	24050.66с	0.000198517
	24052.66с	0.003828237
	24053.66с	0.000434042
	24054.66с	0.000108053
	6000.66с	0.000695158

```

82206.66c 0.001657447
82207.66c 0.00143646
82208.66c 0.003405898
83209.66c 0.008037415
26054.66c 0.00103591
26056.66c 0.016261572
26057.66c 0.000375551
26058.66c 4.9979E-05
28058.66c 0.001236105
28060.66c 0.000476143
28061.66c 2.06995E-05
28062.66c 6.61476E-05
28064.66c 1.68138E-05
42000.66c 2.88941E-05
25055.66c 1.89221E-05
41093.66c 0.000126859
14000.60c 0.001366916
16032.66c 1.08084E-06
15031.66c 1.67809E-06

```

c

```

mode n p
SDEF POS=0 0 0 cel=d1 ERG=d2 AXS=0 0 1 par=2 rad=d3
ext=d4 WGT=1
SI1 L 3
SP1 1
SI2 H 0.04 0.08 0.15 0.35 0.75 1.25 1.75 2.5 3.5
SP2 D 0 5.7417E-04 1.02451E-03 2.3112E-04 0.988821158
      4.818E-03 4.53095E-03 9.7E-08 1.E-09
SI3 0 48.9 $ radius of cyl.
SI4 -2.4 97.6 $ axial range of cyl.
wpp:p 4j -1 3j
f5:p 0 0 -76.9 1
de5 0.06 0.115 0.25
      0.55 1.00 1.5 2.1 3.0
      4.0 5.0 6.25 8 10
df5 1.386E-3 2.127E-3 4.536E-3
      9.612E-3 1.598E-2 2.170E-2 2.797E-2 3.542E-2
      4.320E-2 5.040E-2 5.940E-2 7.164E-2 8.568E-2
f15:p 102.65 0 47.6 1
de15 0.06 0.115 0.25
      0.55 1.00 1.5 2.1 3.0
      4.0 5.0 6.25 8 10
df15 1.386E-3 2.127E-3 4.536E-3
      9.612E-3 1.598E-2 2.170E-2 2.797E-2 3.542E-2
      4.320E-2 5.040E-2 5.940E-2 7.164E-2 8.568E-2
f25:p 0 0 346.1 1
de25 0.06 0.115 0.25
      0.55 1.00 1.5 2.1 3.0
      4.0 5.0 6.25 8 10
df25 1.386E-3 2.127E-3 4.536E-3
      9.612E-3 1.598E-2 2.170E-2 2.797E-2 3.542E-2
      4.320E-2 5.040E-2 5.940E-2 7.164E-2 8.568E-2
f35:p 0 0 -266.9 1

```

```

de35 0.06    0.115  0.25
      0.55    1.00   1.5    2.1    3.0
      4.0    5.0    6.25   8      10
df35  1.386E-3 2.127E-3 4.536E-3
      9.612E-3 1.598E-2 2.170E-2 2.797E-2 3.542E-2
      4.320E-2 5.040E-2 5.940E-2 7.164E-2 8.568E-2
f45:p 292.65 0 47.6 1
de45 0.06    0.115  0.25
      0.55    1.00   1.5    2.1    3.0
      4.0    5.0    6.25   8      10
df45  1.386E-3 2.127E-3 4.536E-3
      9.612E-3 1.598E-2 2.170E-2 2.797E-2 3.542E-2
      4.320E-2 5.040E-2 5.940E-2 7.164E-2 8.568E-2
f55:p 0 0 536.1 1
de55 0.06    0.115  0.25
      0.55    1.00   1.5    2.1    3.0
      4.0    5.0    6.25   8      10
df55  1.386E-3 2.127E-3 4.536E-3
      9.612E-3 1.598E-2 2.170E-2 2.797E-2 3.542E-2
      4.320E-2 5.040E-2 5.940E-2 7.164E-2 8.568E-2
c
nps 500000000
print

```

Рисунок А-1. Исходные данные для бенчмарка в формате программы MCNP

```

mt=7 nzone=7
im= 15 it= 70
jm= 12 jt= 120
t
/ Block2
/ R
xmesh=
/      1      2      3      4      5      6      7      8      9
0.000  1.932 14.961 15.692 28.208 28.991 40.383 40.716 48.9
52.75
/ 10  11    12    13    14    15
57   63    65    79.5  92.65 350.
xints=
      2 4 1 4 1 4 1 3 2 3 5 3 7 10 20
/ Z
ymesh=
0.000 233.1 246.1 262.1 297.6 397.6 412.6 433.1 482.1 559.6
620.1
636.1 1000.
yints=
      20 5 10 5 5 10 5 5 20 10 5
20
/
/ ZONE 1          Воздух

```



```

/ ZONE 2      Гомогенное топливо
/ ZONE 3      Бетон
/ ZONE 4      Сталь
/ ZONE 5      Теплоноситель
/ ZONE 6      ВНС-4
/ ZONE 7      ОР
zones=
  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1;
  6  6  6  6  6  6  6  6  6  6  6  6  6  1;
  4  4  4  4  4  4  4  4  4  4  4  4  4  6  1;
  5  5  5  5  5  5  5  5  5  1  6  1  4  6  1;
  7  2  7  2  7  2  7  2  5  1  6  1  4  6  1;
  5  5  5  5  5  5  5  5  5  1  6  1  4  6  1;
  3  3  3  3  3  3  3  3  1  1  6  1  4  6  1;
  3  3  3  3  3  3  3  3  1  1  6  1  4  1  1;
  3  3  3  3  3  3  3  3  1  1  1  1  4  1  1;
  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  4  1  1;
  4  4  4  4  4  4  4  4  4  4  4  4  4  1  1;
  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1;
t

```

Рисунок А-2. Блок геометрических данных для бенчмарка в формате программы TWODANT

Подписано к печати 16.01.2018. Формат 60×84 ¹/₁₆. Усл. п. л. 0,7. Уч.-изд. л. 0,7.
Тираж 40 экз. Заказ № 2

Отпечатано в ОНТИ методом прямого репродуцирования с оригинала авторов.
249033, Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.
АО «ГНЦ РФ – Физико-энергетический институт имени А. И. Лейпунского».