

# РАСЧЁТ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСПОРТНОГО КОНТЕЙНЕРА ДЛЯ ОБЛУЧЁННОГО ГРАФИТОВОГО ЗАМЕДЛИТЕЛЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ ТИПА РБМК- 1000

**Сидоров Никита Михайлович**, студент  
Ившин Алексей Валерьевич, ст. преподаватель  
Федорович Евгений Данилович, профессор

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра  
Великого  
Высшая школа атомной и тепловой энергетики

## Цель работы:

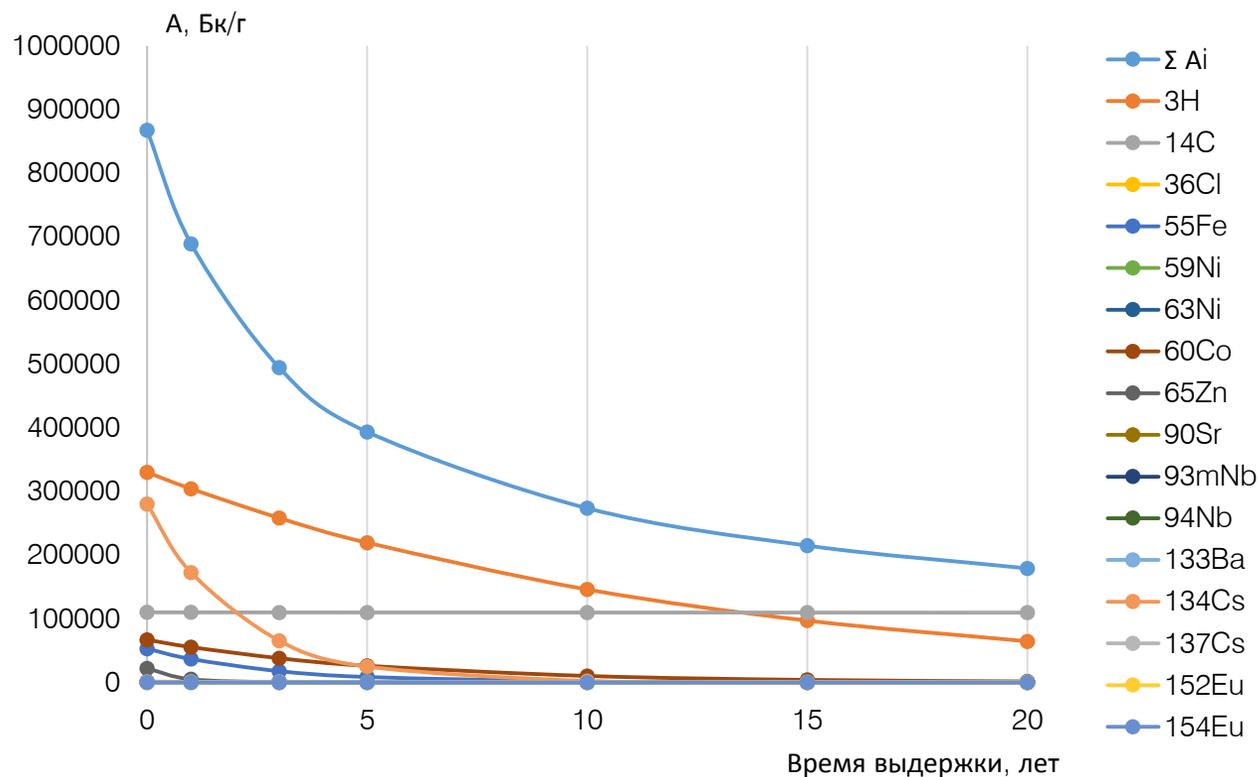
- расчет биологической защиты контейнера для транспортировки и хранения облучённого графита энергетических уран-графитовых реакторов (УГР).

## Задачи:

- оценка защитных свойств конструкционного материала, из которого будет изготовлен контейнер;
- выбор размеров контейнера в зависимости от количества загружаемых графитовых блоков;
- определение толщины биологической защиты, необходимой для соблюдения критериев радиационной безопасности при обращении с радиоактивными отходами.

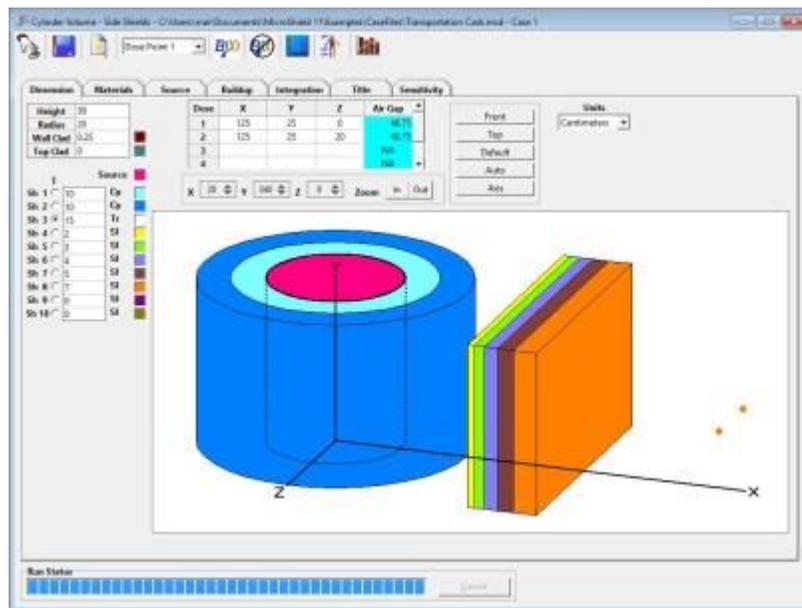
# Состав облучённого графита

Нуклиды	Удельная активность, Бк/г				
	НИЦ «КИ», 2004 [4]	НИЦ «КИ», 2017 [5]	НИ ТПУ [6]	«НИКИЭТ» [7]	«ВНИПИЭТ» [8]
<sup>3</sup> H	31800000	14100000	-	330000	458135
<sup>14</sup> C	132000	125000	690000	110000	1475350
<sup>36</sup> Cl	-	8760	10000	1000	1398
<sup>41</sup> Ca	-	383	-	-	606
<sup>46</sup> Sc	-	36300	-	-	-
<sup>54</sup> Mn	-	878	-	-	-
<sup>55</sup> Fe	51200	128000	-	53000	74544
<sup>59</sup> Fe	-	9570	-	-	-
<sup>59</sup> Ni	23	23	-	430	606
<sup>63</sup> Ni	5690	5360	-	610	9318
<sup>60</sup> Co	42400	52900	52900	67000	8541
<sup>65</sup> Zn	-	-	-	22000	30283
<sup>90</sup> Sr	-	-	30000	1100	1475
<sup>93m</sup> Nb	-	-	-	890	1242
<sup>94</sup> Nb	-	-	-	78	109
<sup>95</sup> Nb	-	11000	-	-	-
<sup>95</sup> Zr	-	9430	-	-	-
<sup>110m</sup> Ag	-	27	-	-	-
<sup>113m</sup> Cd	-	2520	-	-	-
<sup>133</sup> Ba	-	-	-	34	48
<sup>134</sup> Cs	-	-	-	280000	3882
<sup>137</sup> Cs	-	-	240000	940	1320
<sup>144</sup> Ce	-	-	-	-	1242
<sup>152</sup> Eu	-	-	300	52	73
<sup>154</sup> Eu	-	-	200	54	64

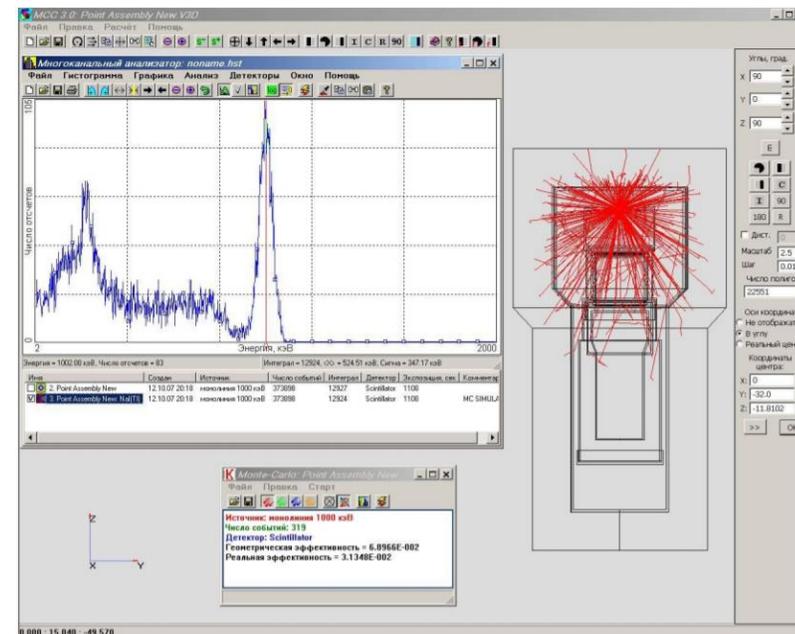


**Диаграмма снижения уровня удельной активности радионуклидов, находящихся в составе графитового блока от времени выдержки**

# Моделирование биологической защиты

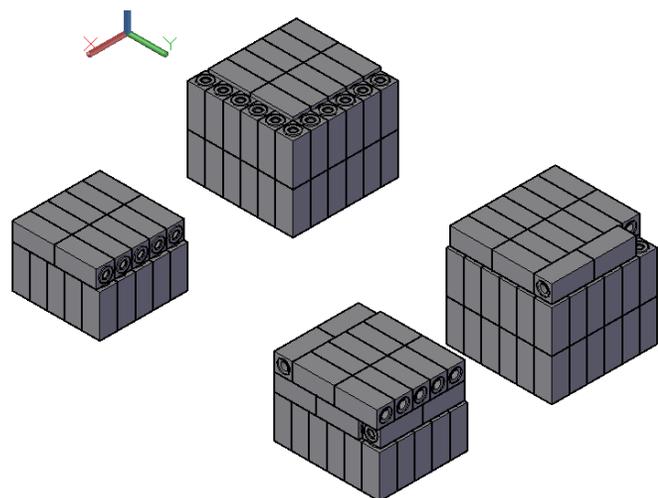
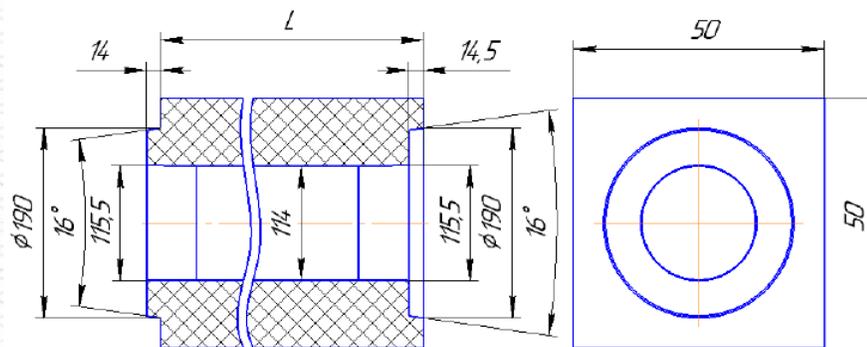
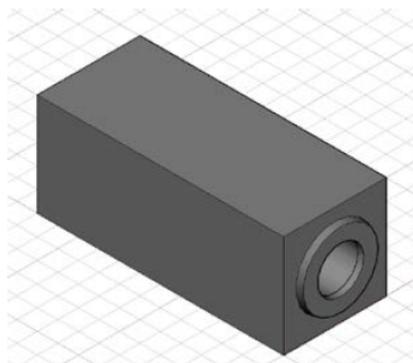
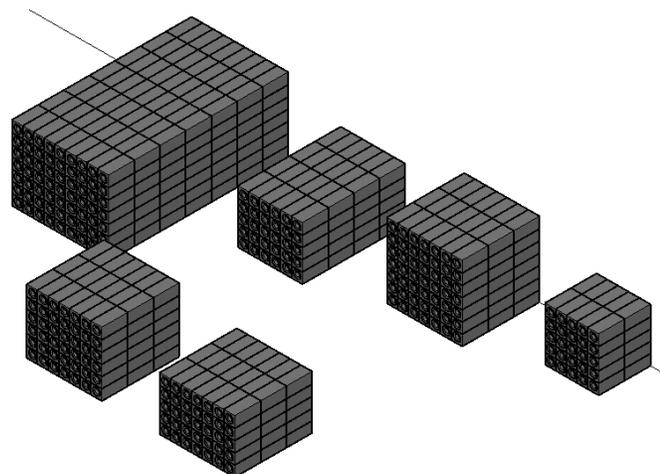


**MicroShield** – программа для расчетов защиты и оценок доз  $\gamma$ -излучения, имеющая возможность анализа различных конфигураций защиты, а также оценки доз облучения персонала и доз в материалах упаковки.



**MCC 3D** – программа для имитационного трёхмерного моделирования систем детектирования и регистрации ионизирующих излучений методом Монте-Карло. Программа MCC 3D моделирует реалистичные схемы распада, имеет развитый графический интерфейс, возможность проводить параллельные вычисления (до 16 потоков)

# Компоновка графитовых блоков

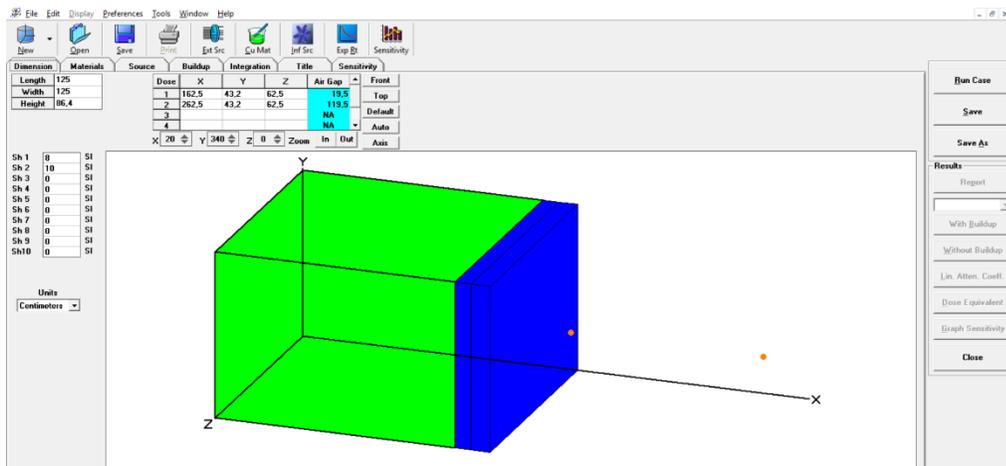


Варианты компоновки графитовых блоков

№-число блоков в контейнере, шт.	Внутренние габариты контейнера, мм
35	864×1250×1250
50	1250×1250×1214
54	1114×1250×1500
72	1250×1500×1500
96	1500×1500×1500

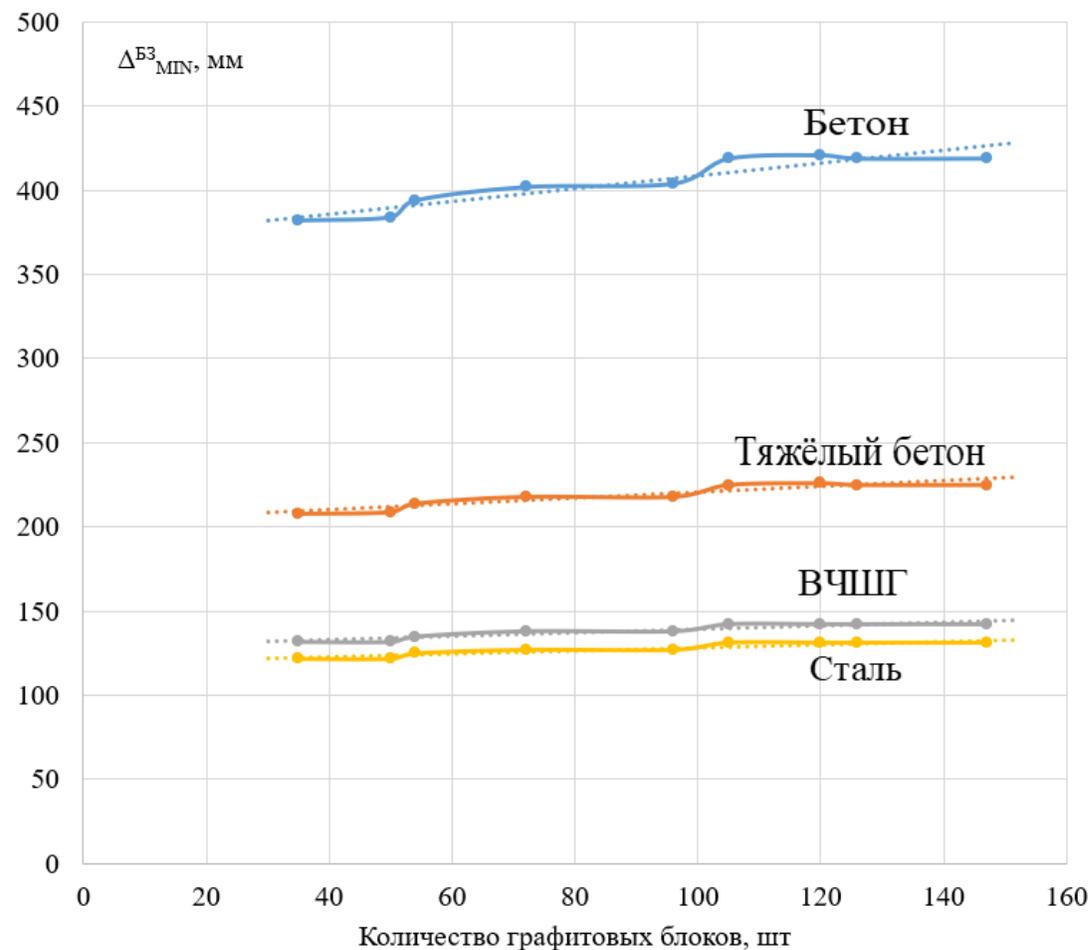
№-число блоков в контейнере, шт.	Внутренние габариты контейнера, мм
105	1250×1750×1214
120	1250×1500×2414
126	1500×1750×1814
147	1750×1750×1814

# Моделирование биологической защиты MicroShield



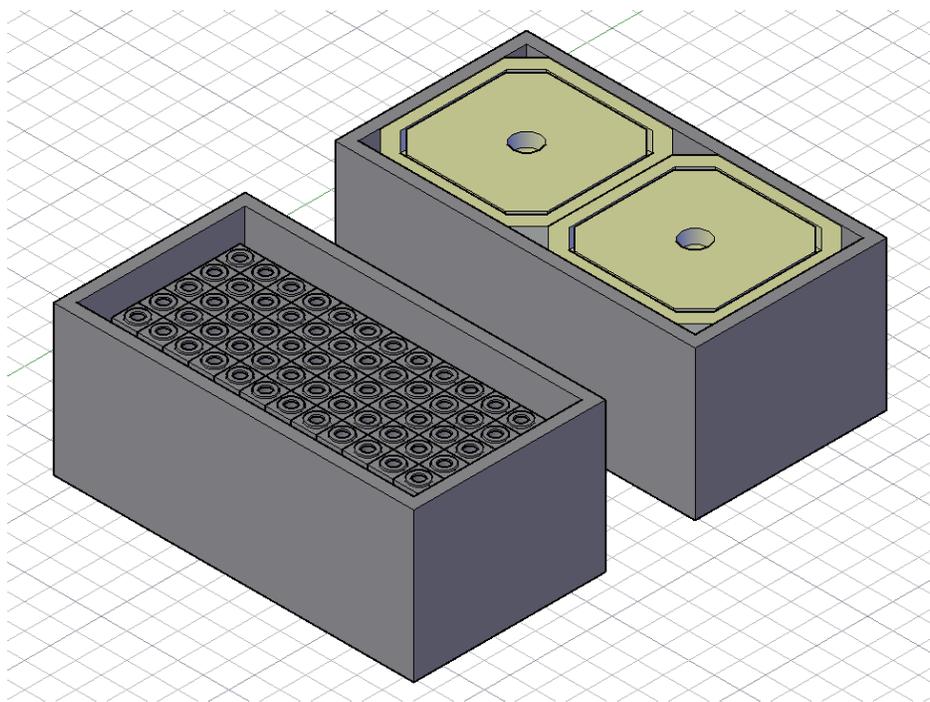
Величина биологической защиты для различных материалов, необходимая для соблюдения критерия 0,1 мЗв/ч на расстоянии 1 м от поверхности согласно НП-053-16

Организация, где проводилось исследование	$\Delta B^3_{min}$ , мм			
	Бетон, $\rho = 2,2 \text{ г/см}^3$	Тяжёлый бетон, $\rho = 4,2 \text{ г/см}^3$	ВЧШГ, $\rho = 7,2 \text{ г/см}^3$	Сталь, $\rho = 7,8 \text{ г/см}^3$
НИЦ «КИ» 2004 [4]	$353,0 \pm 4,0$	$190,0 \pm 2,7$	$120,0 \pm 2,1$	$111,0 \pm 2,0$
НИЦ «КИ» 2017 [5]	$359,9 \pm 4,0$	$195,0 \pm 2,7$	$123,6 \pm 2,1$	$114,1 \pm 2,0$
НИ ТПУ [6]	$405,3 \pm 3,6$	$218,4 \pm 2,4$	$137,0 \pm 1,8$	$126,9 \pm 1,8$
«НИКИЭТ» [7]	$404,9 \pm 3,8$	$218,7 \pm 2,6$	$138,1 \pm 2,0$	$127,4 \pm 1,9$
«ВНИПИЭТ» [8]	$209,6 \pm 4,3$	$114,4 \pm 3,0$	$72,9 \pm 2,3$	$67,4 \pm 2,2$



# Моделирование биологической защиты

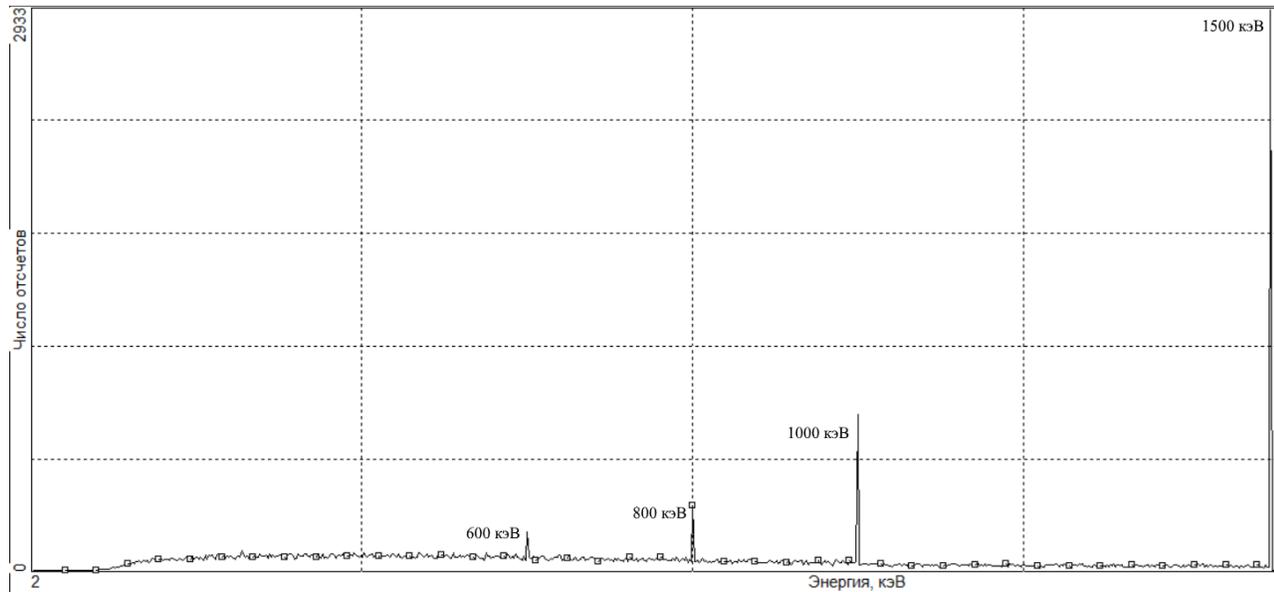
## Модель контейнера



Модель контейнера имеет следующие характеристики:

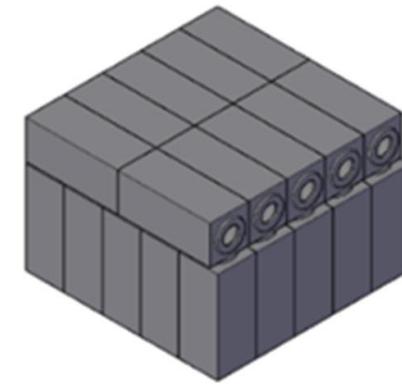
- **наружные габариты** 3520×1870×1620 мм;
- **внутренние габариты** 3300×1650×1350 мм;
- **толщина стенки** из ВЧШГ – 110 мм;
- **масса контейнера** – 21,5 тонны;
- **варианты загрузки**: **загрузка графитовыми блоками** – 120 шт. (вертикально в два ряда), с изолирующим материалом засыпкой из смеси песка и бентонита (для фиксации) или **двумя контейнерами НЗК-150-1,5П**, каждый из которых заполнен 35 графитовыми блоками;
- **масса контейнера с 120 графитовыми блоками** и засыпкой из смеси песка и бентонита – 31,3 тонн;
- **масса контейнера вместе с двумя контейнерами НЗК-150-1,5П**, заполненными графитовыми блоками (70 шт.) – 28,8 тонн.

# Моделирование биологической защиты MCC 3D

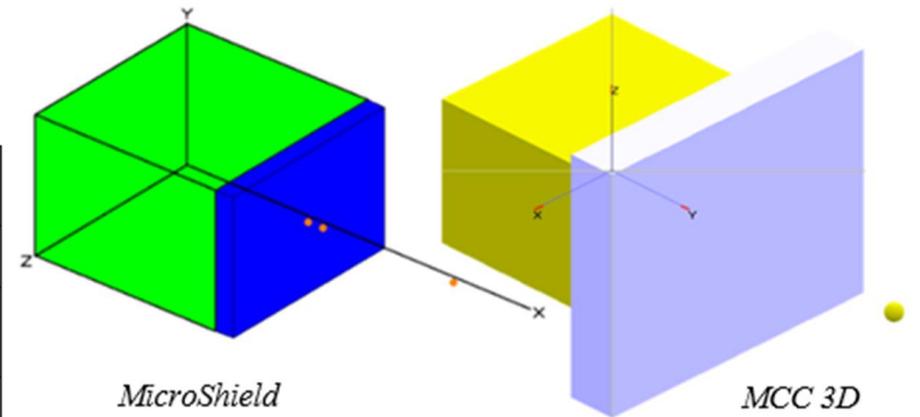


Эквивалентный источник гамма-излучения

Энергия $\gamma$ -квантов, МэВ	$\leq 0,1$	0,15	0,2	0,3	0,4
активность фотонов, част/сек	$1,93 \cdot 10^{10}$	$8,08 \cdot 10^5$	$3,07 \cdot 10^7$	$1,51 \cdot 10^8$	$1,09 \cdot 10^8$
Энергия $\gamma$ -квантов, МэВ	0,5	0,6	0,8	1	1,5
активность фотонов, част/сек	$2,33 \cdot 10^9$	$1,98 \cdot 10^{11}$	$1,51 \cdot 10^{11}$	$1,71 \cdot 10^{11}$	$1,71 \cdot 10^{11}$



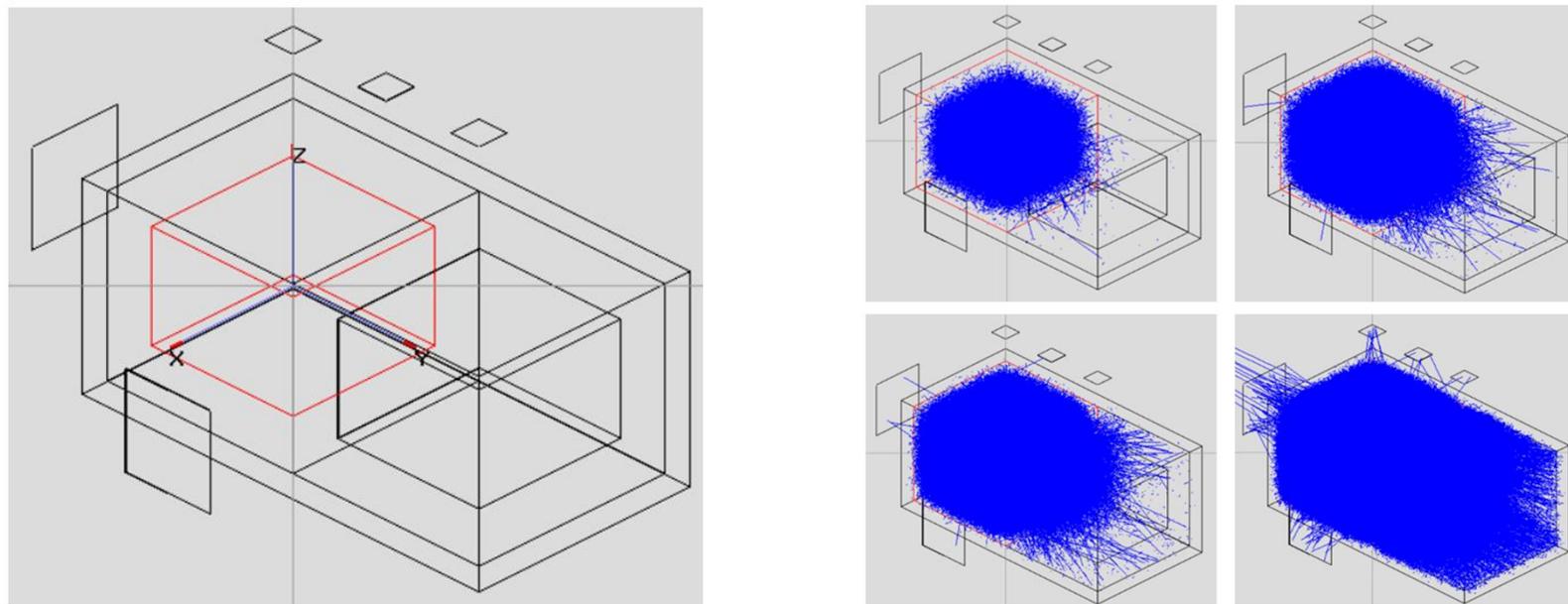
AutoCAD



MicroShield

MCC 3D

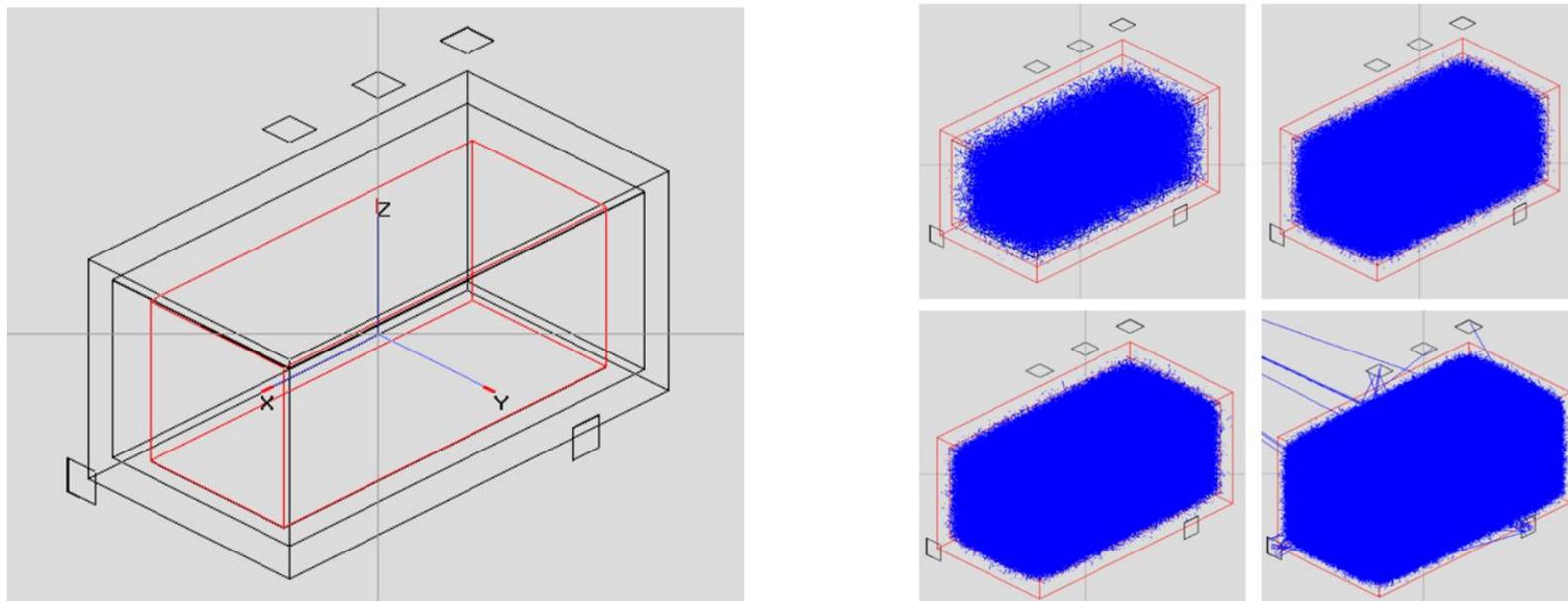
# Моделирование биологической защиты MCC 3D



Расчёт мощности эквивалентной дозы на расстоянии 1 м от поверхности с учётом прогноза для модели контейнера с двумя НЗК

Детектор	Размеры	S, см <sup>2</sup>	H, Зв	Ḣ, мЗв/с	Ḣ, мЗв/ч	<0,1
Основной	25x25 см	625	$8,82 \cdot 10^{-9}$	$8,82 \cdot 10^{-6}$	0,03	
Боковой	75x75 см	5625	$3,92 \cdot 10^{-9}$	$3,92 \cdot 10^{-6}$	0,01	
Торцевой	75x75 см	5625	$7,99 \cdot 10^{-9}$	$7,99 \cdot 10^{-6}$	0,03	

# Моделирование биологической защиты MCC 3D



Расчёт мощности эквивалентной дозы на расстоянии 1 м от поверхности с учётом прогноза для модели контейнера с засыпкой

Детектор	Размеры	S, см <sup>2</sup>	H, Зв	Ḣ, мЗв/с	Ḣ, мЗв/ч	<0,1
Основной	25x25 см	625	$2,33 \cdot 10^{-9}$	$2,33 \cdot 10^{-6}$	0,01	
Боковой	25x25 см	625	$9,03 \cdot 10^{-9}$	$9,03 \cdot 10^{-6}$	0,03	
Торцевой	25x25 см	625	$9,16 \cdot 10^{-9}$	$9,16 \cdot 10^{-6}$	0,03	

Результаты расчёта

Программная система	Материалы биологической защиты	Величина биологической защиты, мм	Максимальная мощность эквивалентной дозы на расстоянии 1 м, мЗв/ч
MicroShield	НЗК + ВЧШГ	Бетон/засыпка – 150 мм ВЧШГ – 110 мм	0,04
	Засыпка + ВЧШГ		0,05
MCC 3D	НЗК + ВЧШГ		0,03
	Засыпка + ВЧШГ		0,03

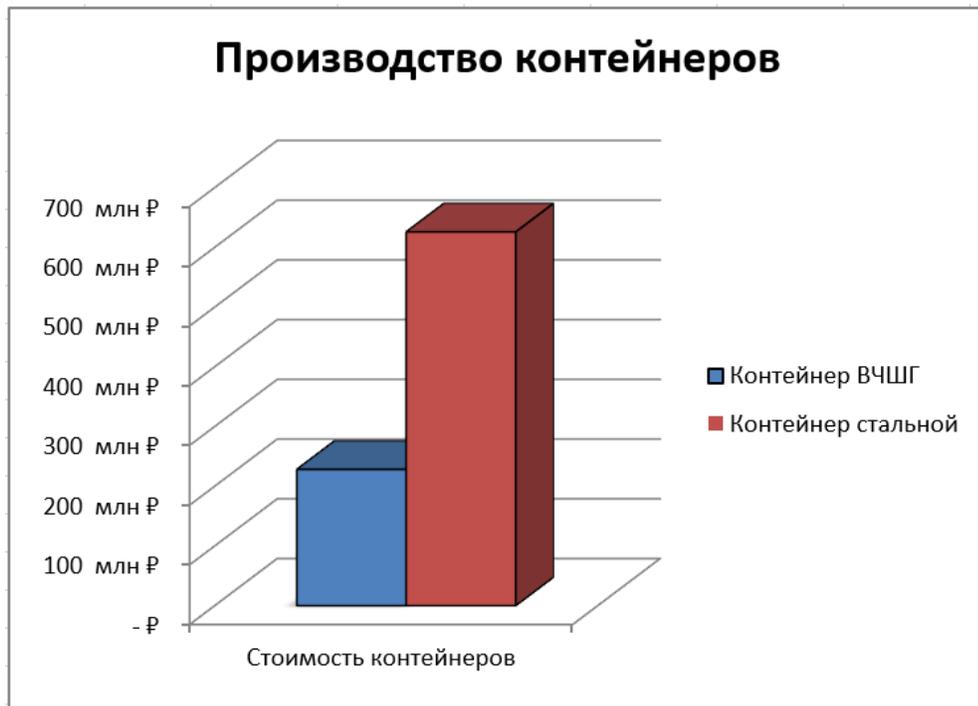
Применение программной системы MS позволяет значительно ускорить процесс оценки применения конструкционных материалов, которые могут быть использованы в качестве биологической защиты, и подобрать оптимальный вариант загрузки в контейнер радиоактивных материалов. Система MCC 3D позволяет смоделировать процесс реального гамма-излучения загружаемого в контейнер радиоактивного материала и использовать разработанную модель для оценки выбранной толщины защиты согласно требуемым нормам радиационной безопасности при транспортировании и временном хранении РАО.

# Благодарю за внимание!

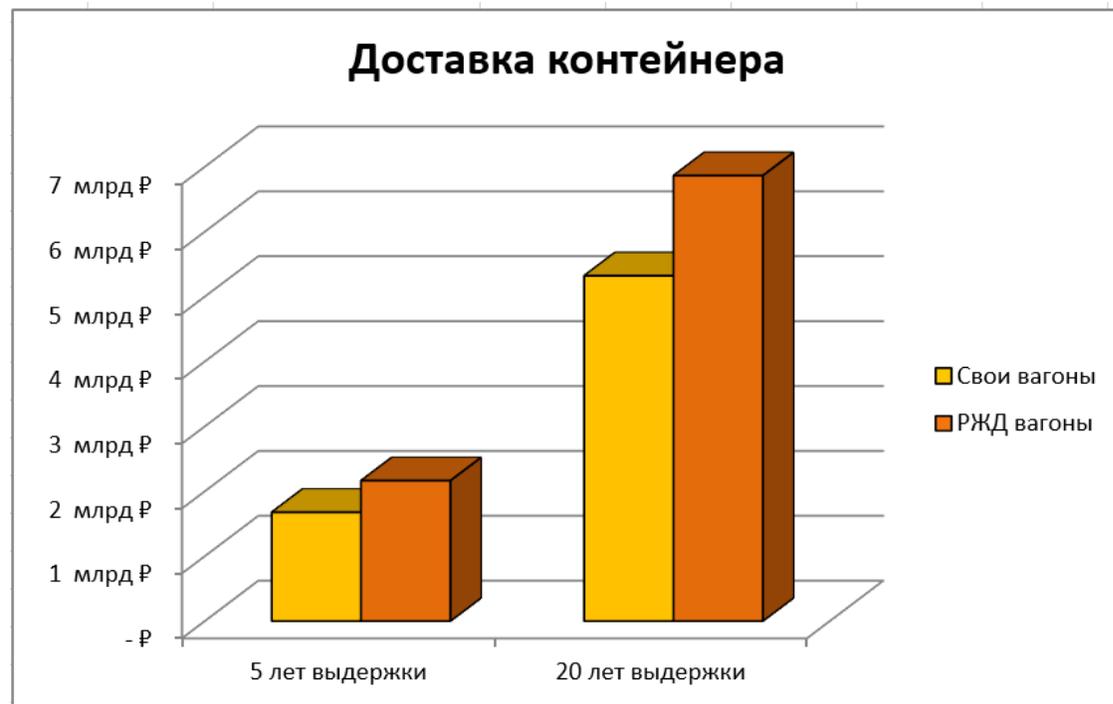
Сидоров Никита Михайлович  
Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого  
Высшая школа атомной и тепловой энергетики  
e-mail: [sidornikta@gmail.com](mailto:sidornikta@gmail.com)



# Конкурентоспособность

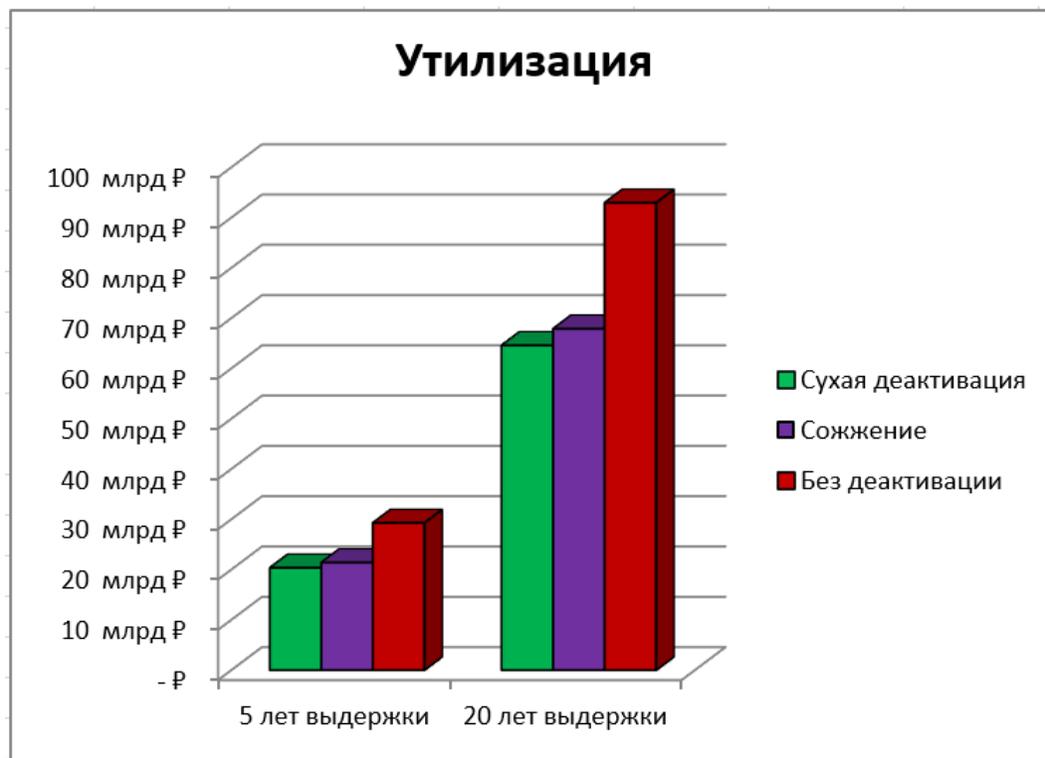


Сравнения стоимости производства парка из 150 контейнеров



Оценка стоимости доставки контейнера

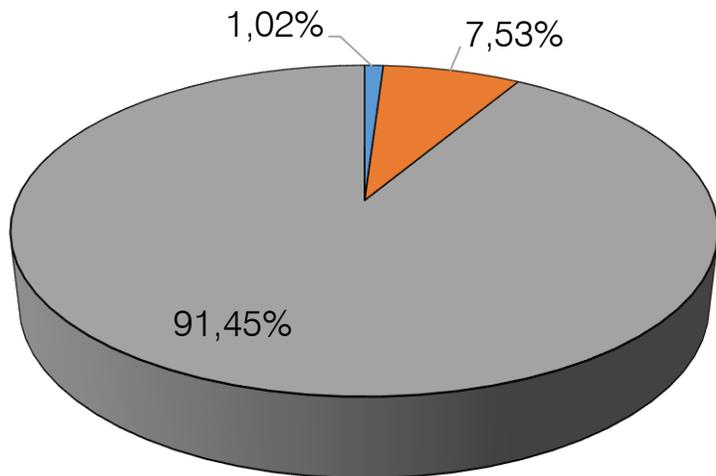




Процесс переработки и утилизации РЗГ

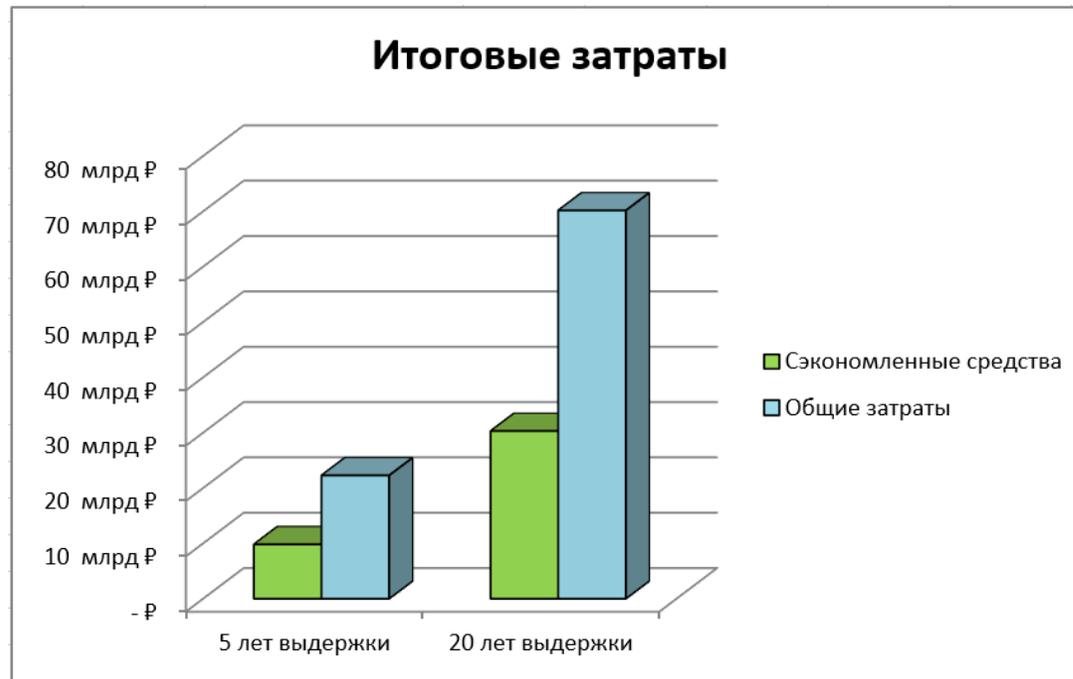
По итогам проведённых расчётов можно сделать вывод, что самую высокую экономическую эффективность показывает комбинация из чугунного контейнера, перевозки в своих вагонах и «сухой» дезактивации перед захоронением. Выбор этих вариантов позволяет сэкономить 39 млрд. Р (48,5%) при выдержке 5 лет и 121 млрд. Р (48%) - при 20 годах выдержки, и все это с общими затратами в 81 млрд. Р и 252 млрд. Р соответственно.

### Структура выручки проекта



■ Контейнер ВЧШГ   ■ Свои вагоны   ■ Сухая деактивация

### Итоговые затраты



В нашем проекте по утилизации облучённого графита, цена рассчитывается по установленным расценкам на все работы, предусмотренные выводом станции из эксплуатации.

Общая экономия затрат по сравнению с традиционными методами захоронения составит приблизительно 43%: на транспортировке к месту захоронения 29%, а на изготовлении контейнера порядка 64%.