XVIII Международный ядерный форум «Безопасность ядерных технологий: транспортирование радиоактивных материалов» («АТОМТРАНС-2024»)
Санкт-Петербург, 7 –11 октября 2024 г.

Опыт разработки и обоснования конструкции ТУК SOSNY C168 для транспортирования облученных ТВС и твэлов

Гаязов Артём Зуферович

Начальник отдела научных исследований и обоснования безопасности технологий
АО НПФ «Сосны»

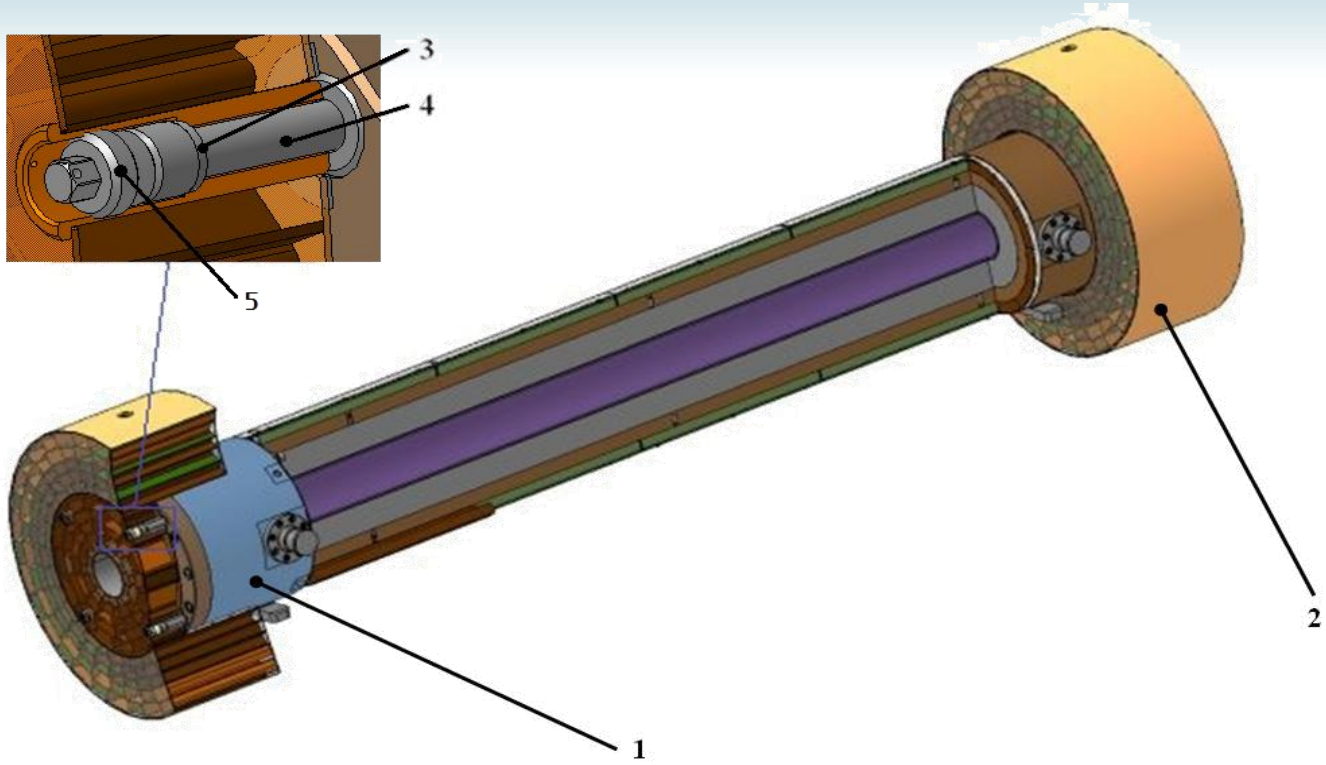
Назначение ТУК SOSNY C168

ТУК SOSNY C168 предназначен для обеспечения безопасности при транспортировании автомобильным, железнодорожным и водным видами транспорта ОТВС и твэлов с исследовательских реакторных установок и атомных электростанций в комплекс защитных камер китайского института атомной энергии (CIAE).

Номенклатура радиоактивного содержимого ТУК SOSNY C168

ОТВС китайского экспериментального реактора на быстрых нейтронах (CEFR)	ОТВС китайского усовершенствованного исследовательского реактора (CARR)	Твэл с МОКС-топливом реактора на быстрых нейтронах (CFR 600)	Твэл с UO_2 реактора на быстрых нейтронах (CFR 600)	Твэл реактора PWR
1 шт.	1 шт.	До 20 шт.	До 20 шт.	До 8/20 шт.

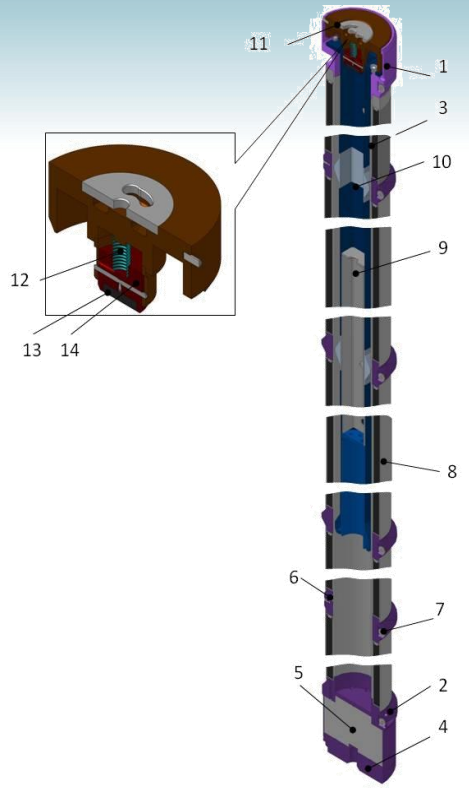
Состав ТУК SOSNY C168



1 – контейнер; 2 – демпфер; 3 – шайба; 4 – винт; 5 – заглушка

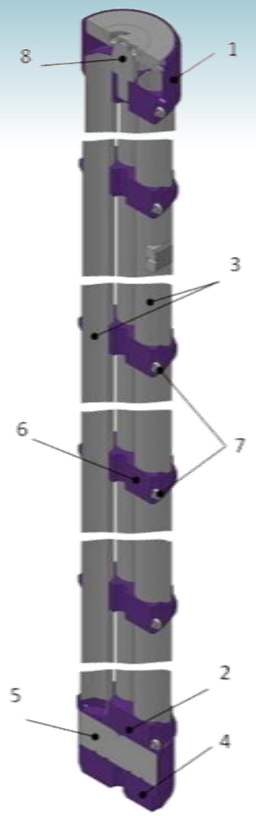
Защитный контейнер

Состав ТУК SOSNY C168



1 – горловина; 2 – дно; 3 – стакан; 4 – заглушка; 5 – вставка; 6 – лист опорный; 7 – ролик; 8 – поглотитель нейтронный; 9 – подставка; 10 – ложемент; 11 – вытеснитель; 12 – пружина; 13 – упор; 14 – поджим

Чехол для ОТВС

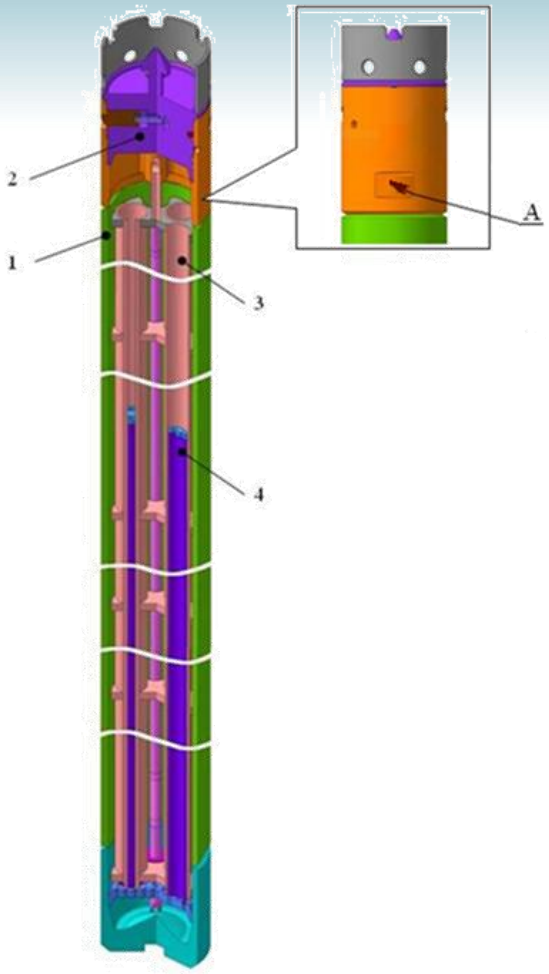


1 – горловина; 2 – дно; 3 – стакан; 4 – заглушка; 5 – вставка; 6 – решетка; 7 – ролик; 8 – вытеснитель

Чехол для упорядоченной загрузки пеналов с твэлами

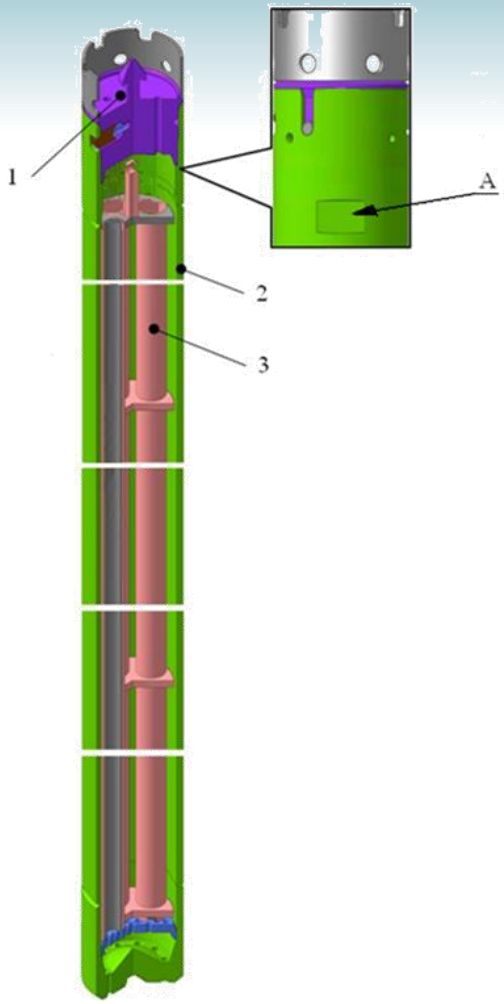
[4]

Состав ТУК SOSNY C168



1 – корпус; 2 – крышка; 3 – сепаратор; 4 – подставка

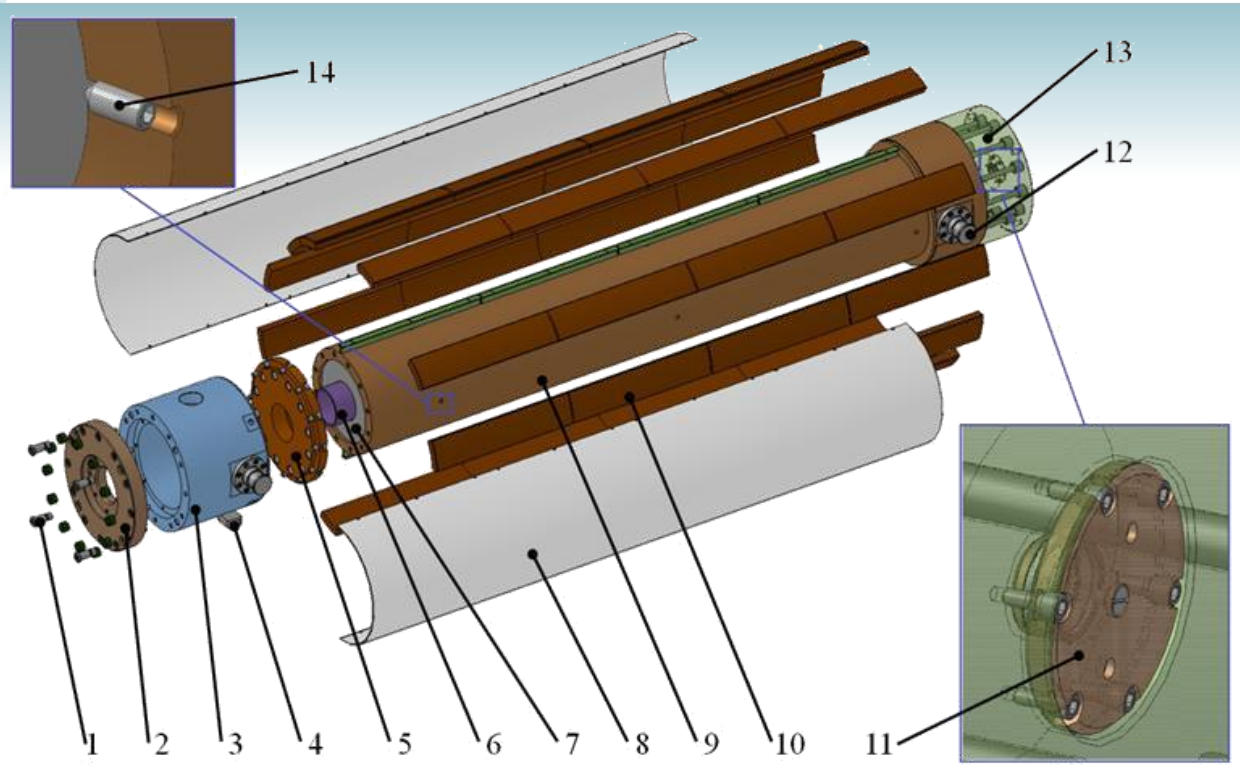
Пенал для твэлов герметичный



1 – крышка; 2 – корпус; 3 – сепаратор;

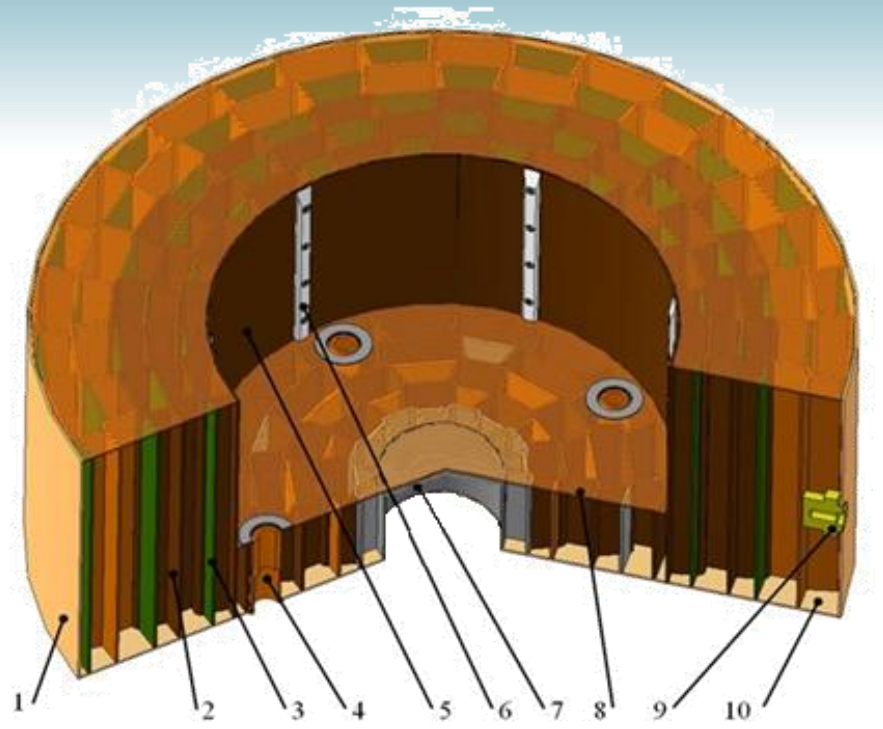
Пенал для твэлов негерметичный

Конструкция защитного контейнера ТУК SOSNY C168



1 – вставка; 2 – фланец корпуса; 3 – горловина; 4 – опора; 5 – фланец переходной; 6 – обечайка корпуса; 7 – втулка свинцовая; 8 – полуобечайка; 9 – втулка стальная; 10 – нейтронная защита; 11 – заглушка проходки; 12 – цапфа; 13 – дно; 14 – винт установочный; 15 – шиберный узел

Корпус защитного контейнера



1 – обечайка наружная; 2 – ребро; 3 – пластина; 4 – втулка демпфера; 5 – обечайка внутренняя; 6 – накладка; 7 – обечайка малая; 8 – лист торцевого демпфера; 9 – бобышка; 10 – лист радиального демпфера

Демпфер

[6]

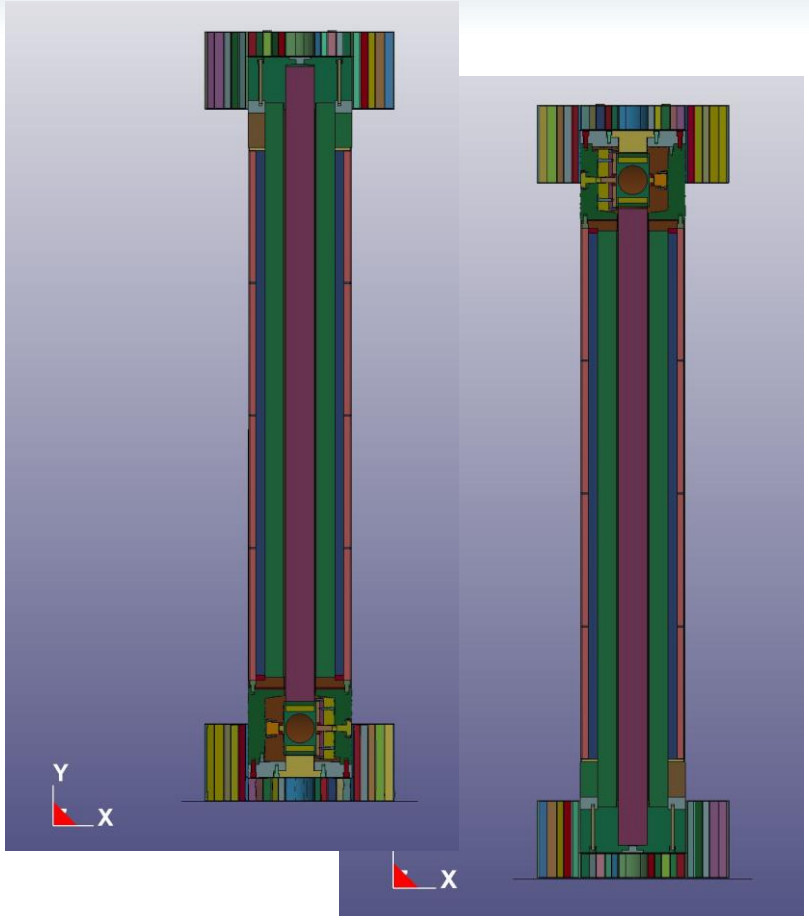
Характеристики ТУК SOSNY C168

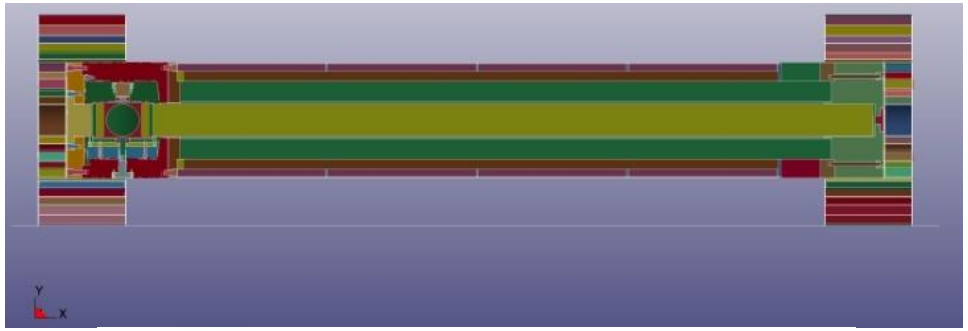
Максимальная расчетная масса ТУК без учета радиоактивного содержимого	21497 кг
Расчетная масса защитного контейнера	21103 кг
Расчетная масса контейнера (без демпферов)	19060 кг
Габаритные размеры:	
▪ длина защитного контейнера	5886 мм
▪ длина контейнера (без демпферов), не более	5480 мм
▪ наружный диаметр (по демпферам)	1450 мм
▪ наружный диаметр (по корпусу)	790 мм
Размеры внутренней полости:	
▪ диаметр, не менее	221 мм
▪ длина, не более	4836 мм

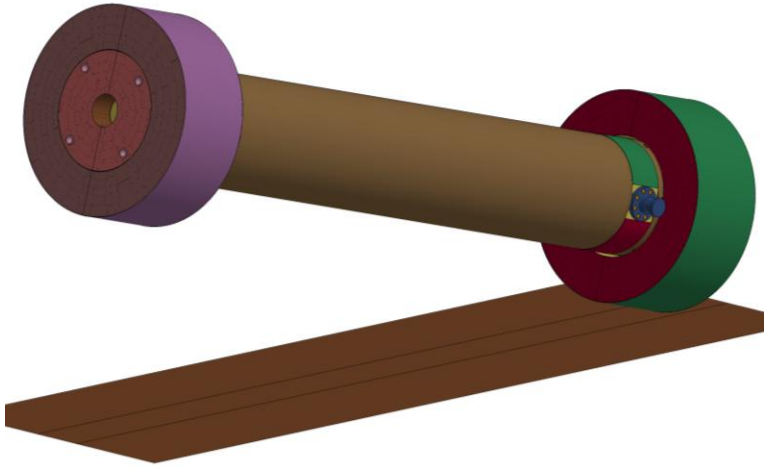
Упаковка ТУК SOSNY C168 относится к типу B(U). Перевозка упаковки осуществляется вне условий исключительного использования, а также на условиях исключительного использования с увеличением загрузки твэлов реактора PWR до 20 штук.

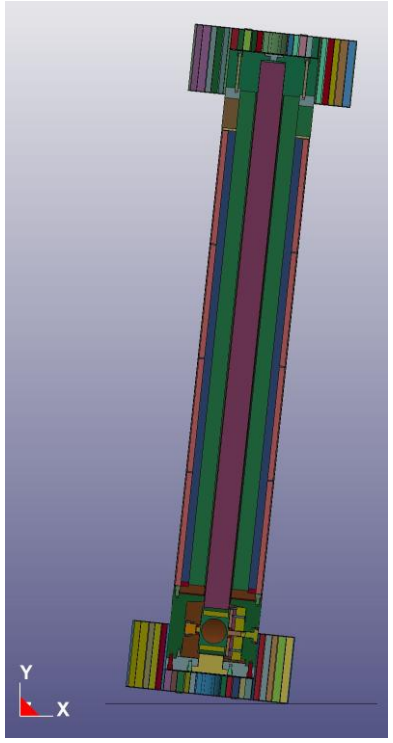
Расчетное обоснование конструкции упаковки

Обоснование прочности в аварийных условиях транспортирования





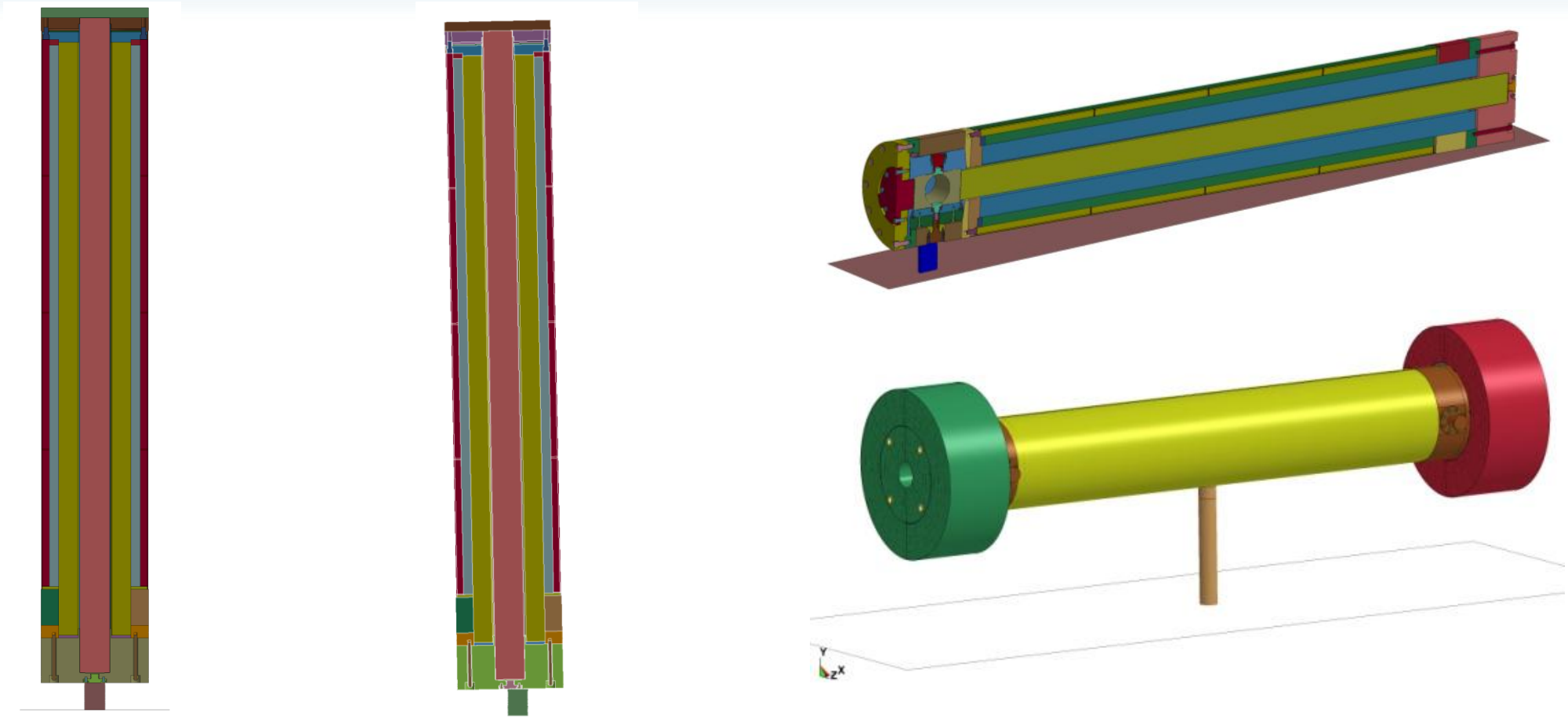




Рассмотренные варианты падения с высоты 9 м на плоское основание

Расчетное обоснование конструкции упаковки

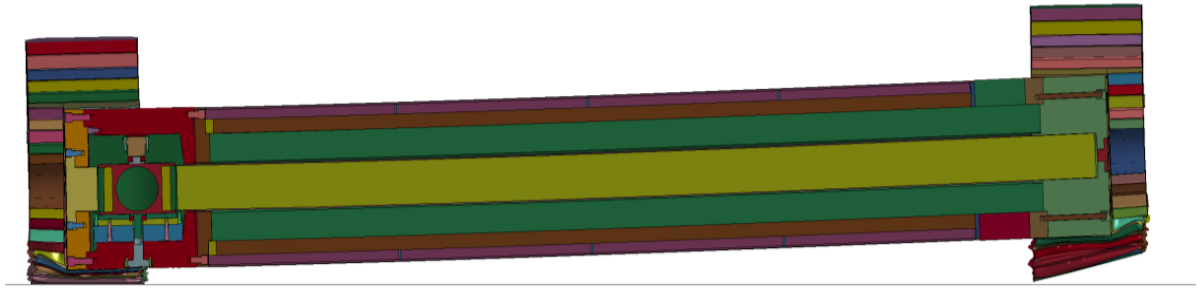
Обоснование прочности в аварийных условиях транспортирования

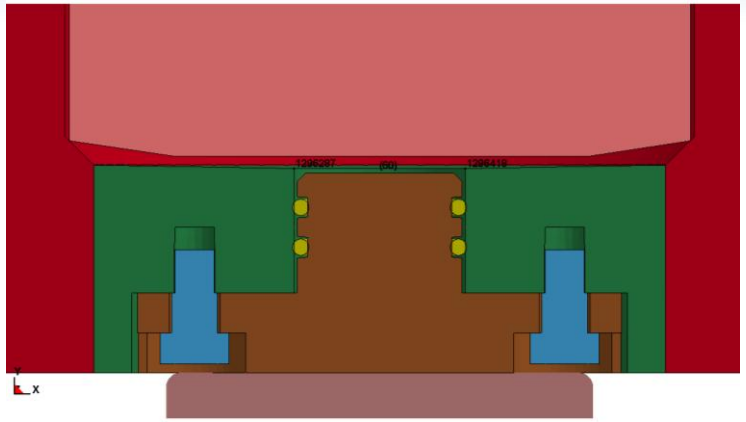


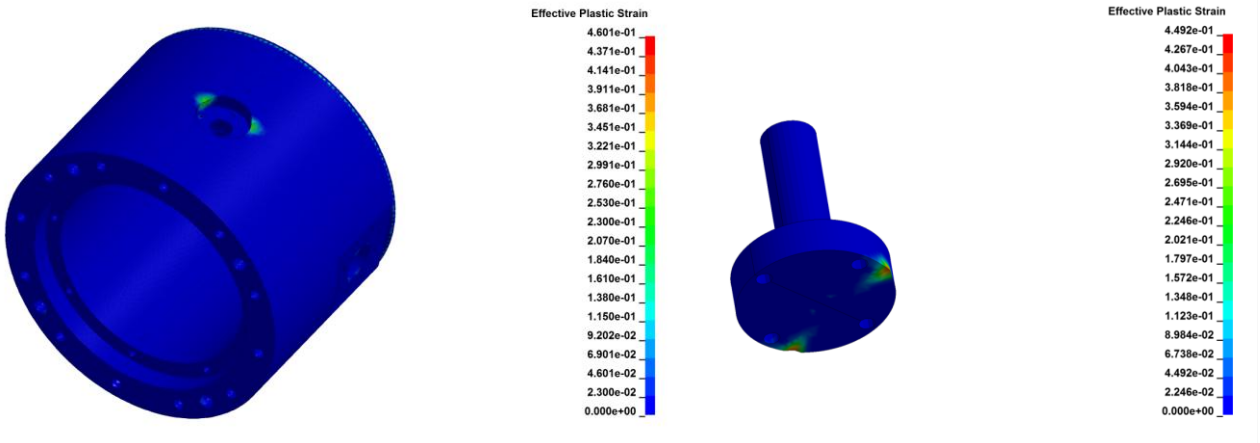
Рассмотренные варианты падения с высоты 1 м на штырь

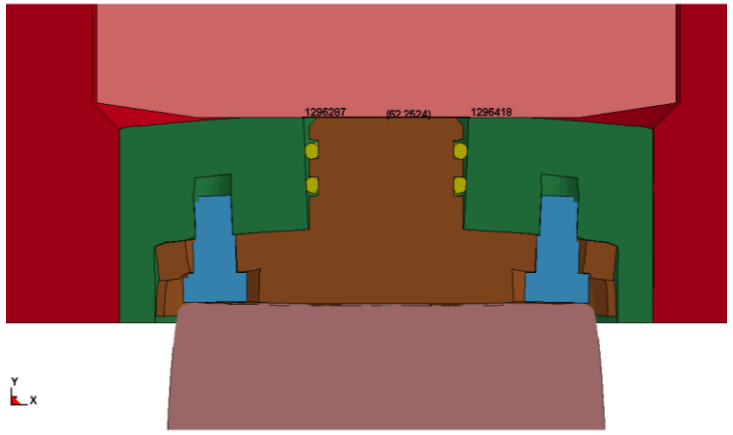
Расчетное обоснование конструкции упаковки

Обоснование прочности в аварийных условиях транспортирования









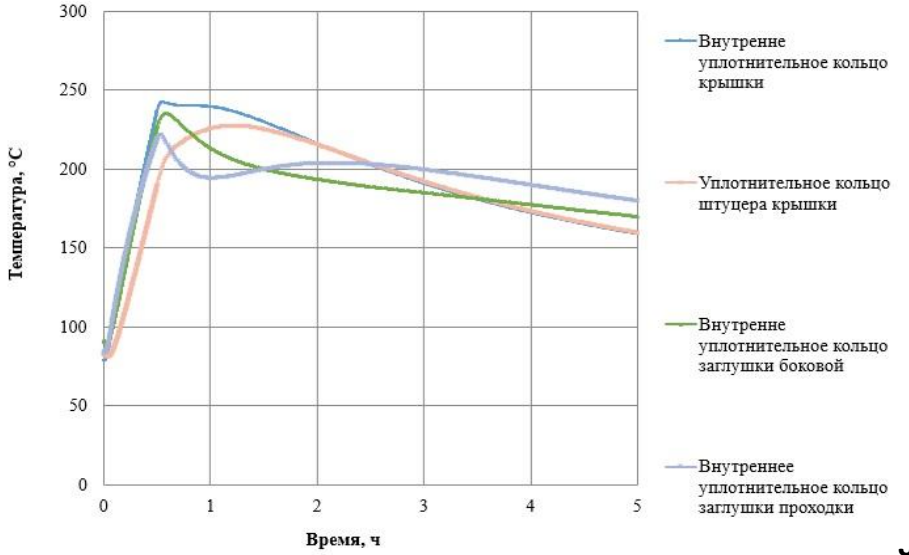
Наклонное падения с высоты 9 м на плоское основание. Результаты расчета

Осевое падения на штырь с высоты 1 м. Результаты расчета

Расчетное обоснование конструкции упаковки

Обоснование тепловых режимов упаковки

Распределение температуры в обычных условиях перевозки 8 твэлов PWR (772 Вт)



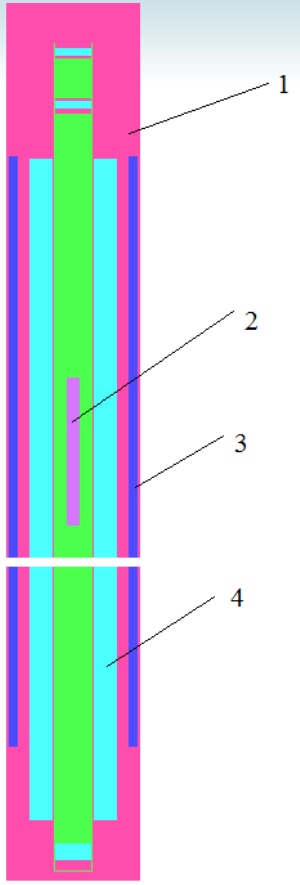
Изменение температуры уплотнительных колец в аварийных условиях перевозки 20 твэлов PWR (1930 Вт)

Сводная таблица максимальных значений температуры ТУК SOSNY C168 с твэлами PWR

Составные элементы упаковки	Обычные условия перевозки без учета воздействия инсоляции (предельно допустимое значение)	Обычные условия перевозки с учетом воздействия инсоляции (предельно допустимое значение)	Аварийные условия перевозки (предельно допустимое значение)
Защитный контейнер (внешняя поверхность)	48 (50) 80 (85)*	97*	664*
Уплотнения	65 (250) *	83 (250) *	243 (250) *
Топливо	194*	204*	300*
Слой полиэтилена ПС-20-5Б	89 (130) *	106 (130) *	>130*
Слой свинца	94 (327,5) *	109 (327,5) *	260 (327,5) *

Расчетное обоснование конструкции упаковки

Обоснование радиационной безопасности



1 – корпус (сталь); 2 – источник излучения;
3 – полиэтилен; 4 – свинец

Общий вид геометрической модели контейнера

Обычные условия

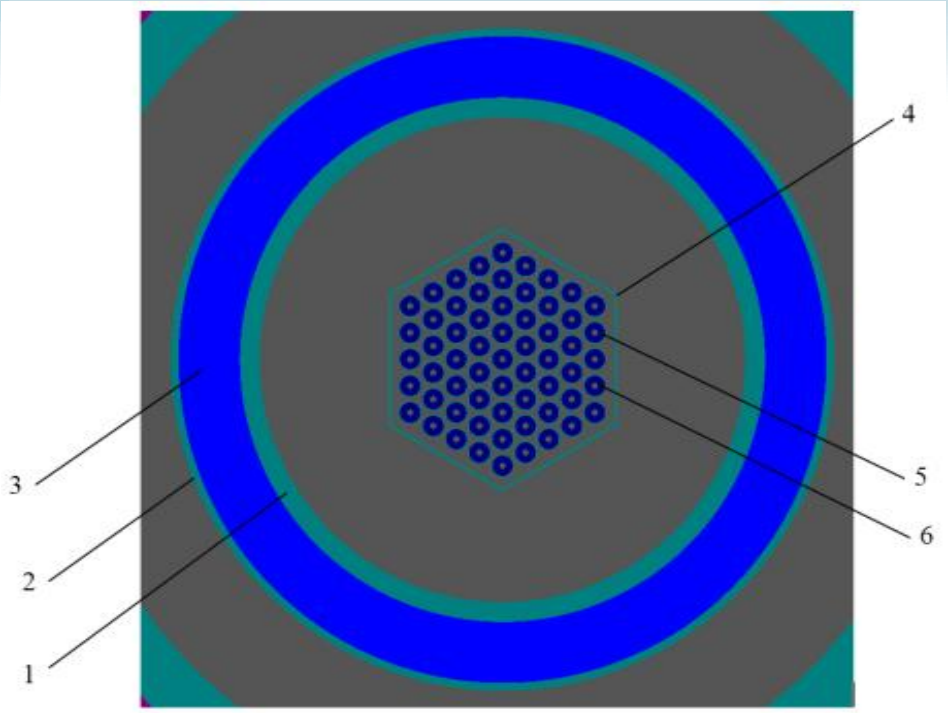
	На поверхности упаковки, мЗв/ч			На расстоянии 1 м от поверхности упаковки, мЗв/ч		
Излучение	Торцевая верхняя	Боковая	Торцевая нижняя	Торцевая верхняя	Боковая	Торцевая нижняя
Гамма	$1{,}5\cdot10^{-5}$	0,27	$1{,}9\cdot10^{-5}$	$1{,}9\cdot10^{-5}$	$7{,}1\cdot10^{-2}$	$3{,}8\cdot10^{-2}$
Нейтронное	$1{,}9\cdot10^{-2}$	0,26	$2{,}7\cdot10^{-4}$	$1{,}4\cdot10^{-3}$	$5{,}3\cdot10^{-2}$	$3{,}9\cdot10^{-2}$
Всего	$1{,}9\cdot10^{-2}$	0,53	$2{,}9\cdot10^{-4}$	$1{,}4\cdot10^{-3}$	0,12	$7{,}7\cdot10^{-2}$

Аварийные условия

	На расстоянии 1 м от поверхности упаковки, мЗв/ч		
Излучение	Торцевая верхняя	Боковая	Торцевая нижняя
Гамма	$7{,}8\cdot10^{-6}$	0,19	4,7
Нейтронное	$1{,}5\cdot10^{-4}$	0,32	$5{,}2\cdot10^{-1}$
Итого	$1{,}5\cdot10^{-4}$	0,41	5,2

Расчетное обоснование конструкции упаковки

Обоснование ядерной безопасности



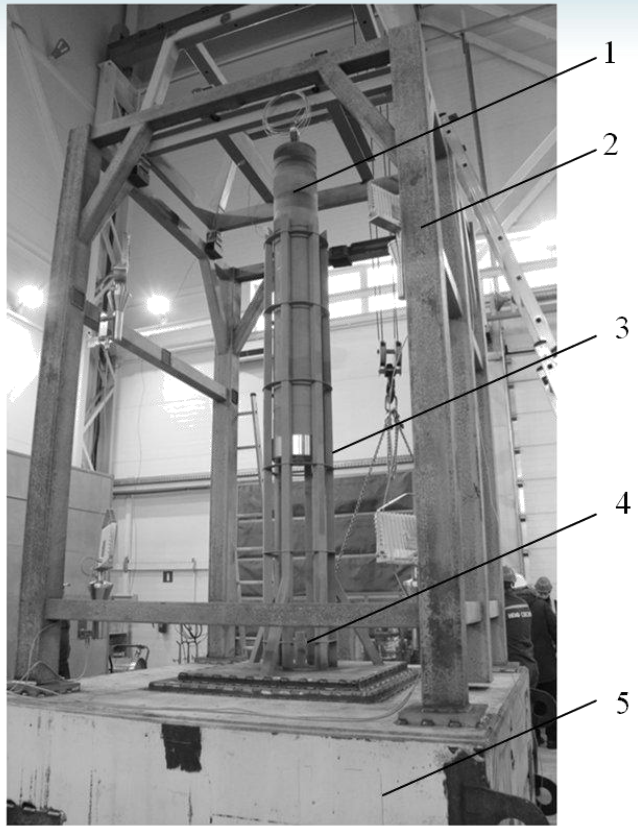
1 – внутренняя обечайка чехла (сталь);
2 – наружная обечайка чехла (сталь);
3 – нейтронный поглотитель (B_4C плотностью не менее 1 г/см^3); 4 – чехловая труба ОТВС (сталь); 5 – оболочка твэла (сталь); 6 – топливный сердечник (UO_2 или МОХ)

Сечение горизонтальной плоскостью геометрической модели ячейки чехла с ОТВС реактора CEFR в обычных условиях перевозки

Количество упаковок	Условия перевозки	$K_{эфф} \pm \Delta K_{эфф}$
1	Обычные условия перевозки: – радиоактивное содержимое находится в неповрежденном состоянии; – вода в полости упаковки отсутствует	0,1486±0,0064
1	Аварийные условия перевозки: – радиоактивное содержимое находится в поврежденном состоянии; – полости упаковки заполнены водой	0,7428±0,0078
∞	Обычные условия перевозки: – радиоактивное содержимое находится в неповрежденном состоянии; – вода в полостях упаковок отсутствует	0,1487 ± 0,0064
∞	Аварийные условия перевозки: – радиоактивное содержимое находится в поврежденном состоянии; – полости упаковок заполнены водой	0,7435 ± 0,0075

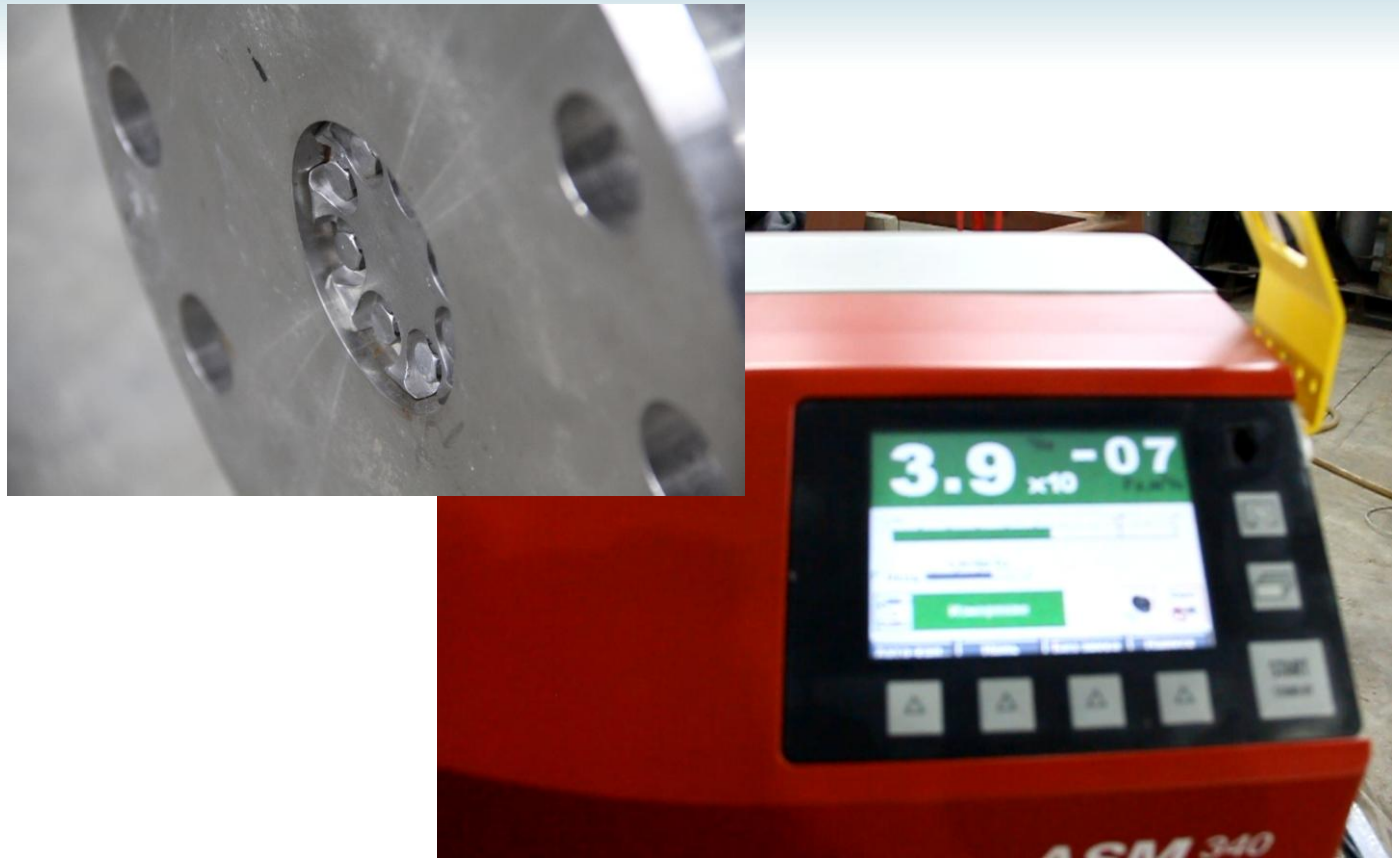
Экспериментальное обоснование конструкции упаковки

Испытание радиального уплотнения заглушки проходки



1 – макет контейнера; 2 – стапель; 3 – шахта; 4 – штырь; 5 – плита

Испытательный стенд с макетом дна контейнера



Результаты испытания макета дна контейнера

Экспериментальное обоснование конструкции упаковки

Натурные испытания масштабного макета ТУК SOSNY C168

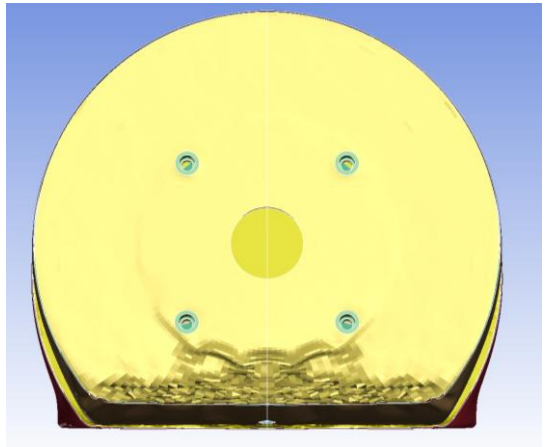
Испытательный стенд с макетом дна контейнера

Технические характеристики масштабного макета:

- наружный диаметр (по демпферам) 580 мм
- наружный диаметр (по корпусу) 316 мм
- диаметр внутренней полости 88 мм
- размер по цапфам 432 мм
- длина внутренней полости 1934 мм
- толщина защитной стенки корпуса (по стали) 35 мм
- толщина защитной стенки корпуса (по свинцу) 56 мм
- толщина защитной стенки корпуса (по полиэтилену) 21 мм

Экспериментальное обоснование конструкции упаковки

Наклонное падение макета ТУК SOSNY C168 под углом 15 градусов к поверхности преграды с высоты 9 метров

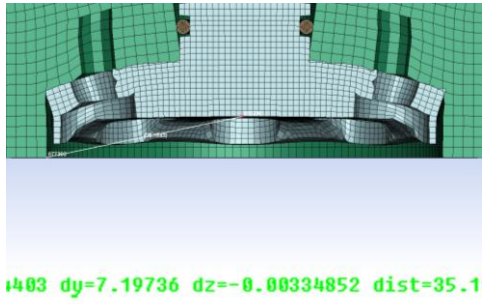


Состояние масштабного макета после падения

Характеристика деформации при натурных испытаниях	Характеристика деформации по результатам численного моделирования
Нижний демпфер – пятно контакта трапециевидной формы с длинами оснований 400±1,3 мм и 245±1,3 мм	Нижний демпфер – пятно контакта в форме трапеции с длинами оснований 400 мм и 378 мм
Два болта крепления демпфера из четырех «срезало» при падении	Все болта крепления демпфера «срезало» при падении
Верхний демпфер – пятно контакта с мишенью прямоугольной формы 355±1,3 мм на 375±1,3 мм.	Верхний демпфер – пятно контакта трапециевидной формы с длинами оснований 375 мм и 377 мм
Все болты крепления демпфера сохранили целостность	Все болта крепления демпфера «срезало» при падении
Деформация элементов корпуса макета контейнера отсутствует	Элементы корпуса макета контейнера имеют локальные деформации в зоне контакта с демпферами

Экспериментальное обоснование конструкции упаковки

Осевое падение макета ТУК SOSNY C168 с высоты 1 метр на штырь



Состояние масштабного макета после падения

Характеристика деформации при натурных испытаниях	Характеристика деформации по результатам численного моделирования
По результатам проведенного испытания корпус масштабного макета получил повреждения в месте взаимодействия со штырем. Диаметр деформированной области (54,0±0,1) мм, глубина относительно торцевой поверхности корпуса контейнера 6±0,1мм	В процессе соударения штыря и заглушки проходки, последняя сместилась в направлении полости контейнера на глубину не более 7,2 мм относительно торцевой поверхности контейнера

Заключение

- По результатам проделанной работы разработан ТУК, отвечающий требованиям российских и зарубежных нормативных документов и обеспечивающий перевозку широкой номенклатуры радиоактивного содержимого.
- Результаты натурных испытаний использованы для верификации расчетных методик, применяемых при обосновании безопасности конструкций упаковок.
- На следующих этапах работы предполагается изготовление и поставка полномасштабной упаковки, а также расширение номенклатуры радиоактивного содержимого.

Спасибо за внимание!

АО Научно-производственная фирма «Сосны»
Ульяновская обл., г. Димитровград,
пр. Димитрова, 4 а

+7 (84235) 3-98-29
www.sosny.ru