

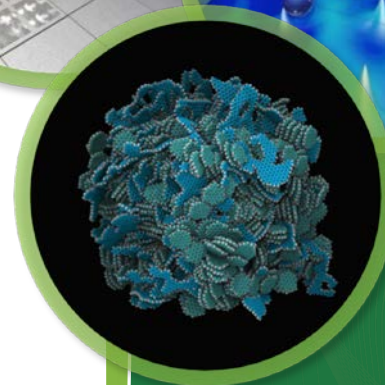
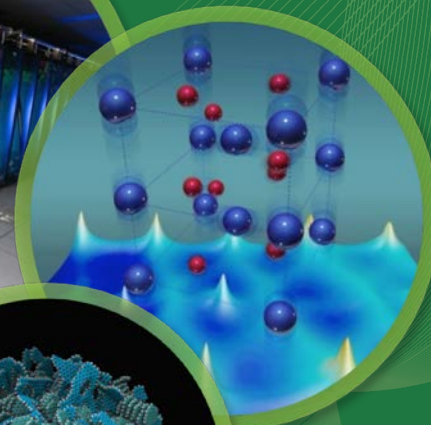
Проект сбора данных по ОЯТ с высоким выгоранием (США)

Забабахинские научные чтения
13-я Международная конференция
Снежинск, Челябинская область,
Российская Федерация
20-24 марта 2017 г.

Брюс Бевард, Роуз Монтгомери,
Джон Скаглионе

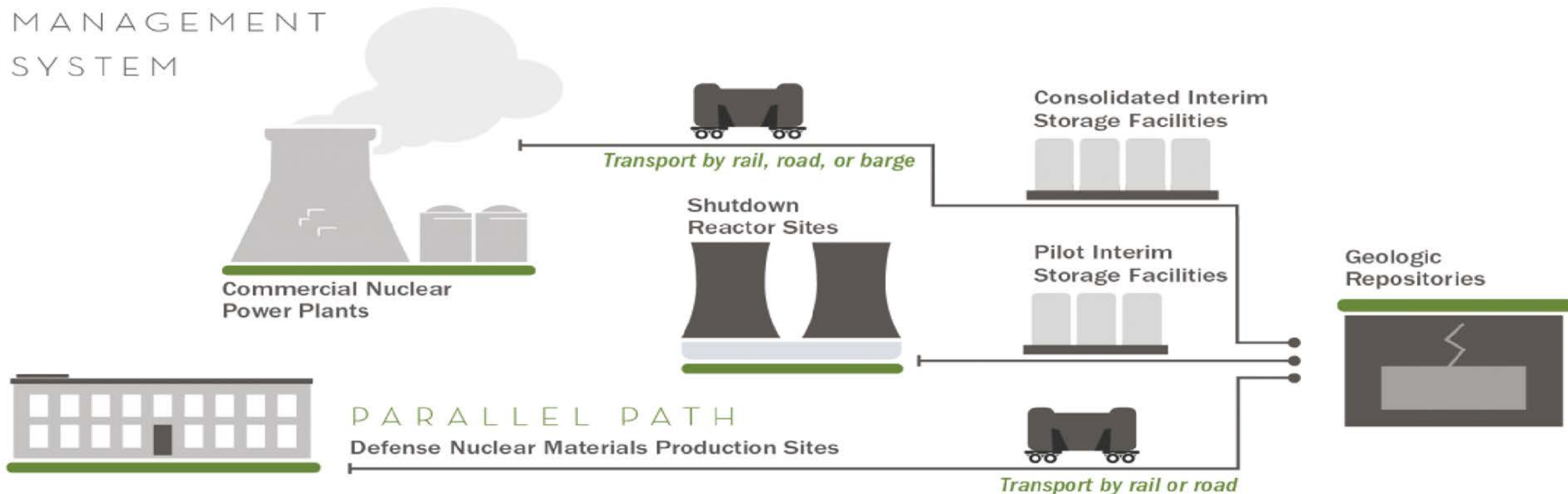
Окриджская национальная лаборатория

Средства на выполнение работ
выделены по Научно-
технической программе по
отработавшему топливу и
отходам Управления ядерной
энергетики Министерства
энергетики США совместно с
компанией UT-Battelle, LLC.
ОРНЛ управляется Институтом Баттелла по поручению Министерства энергетики США

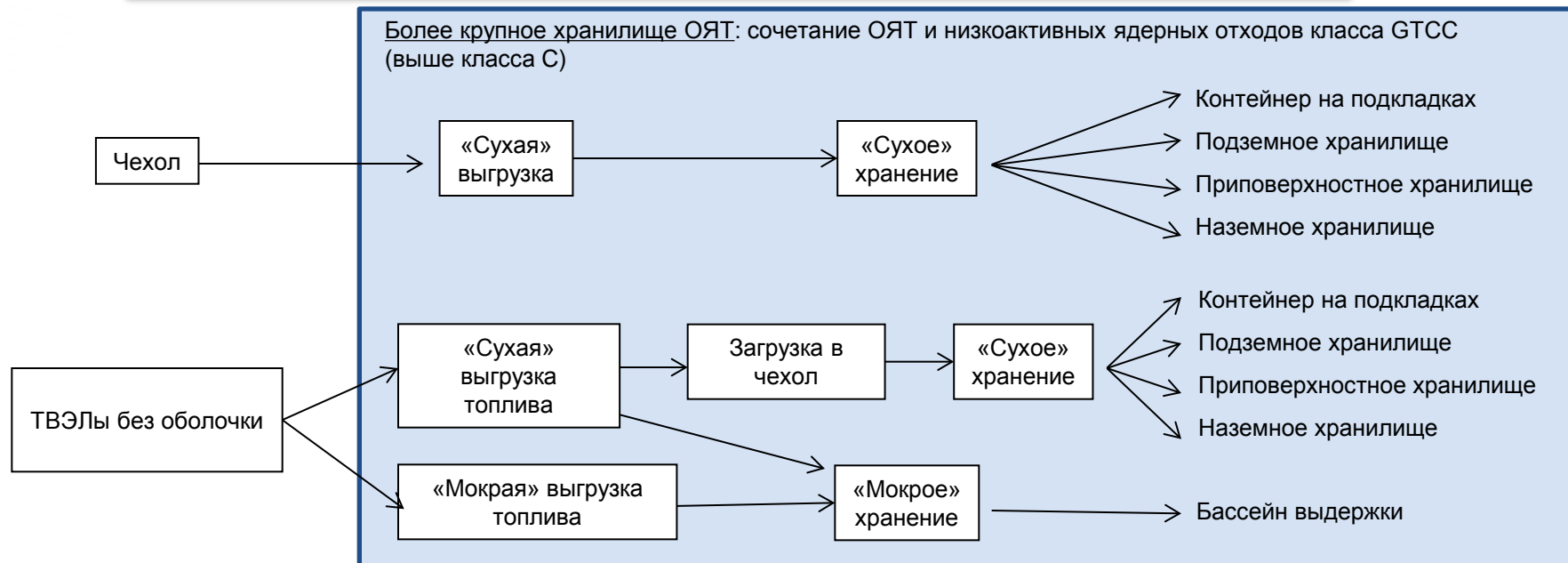
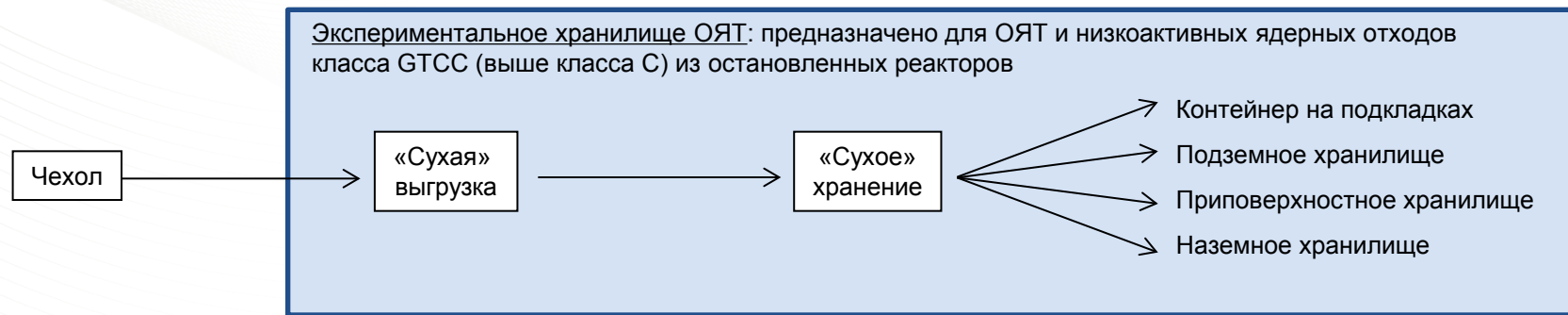


Планы министерства энергетики США по комплексной системе обращения с ядерными отходами для транспортировки, хранения и утилизации ОЯТ и ВАО

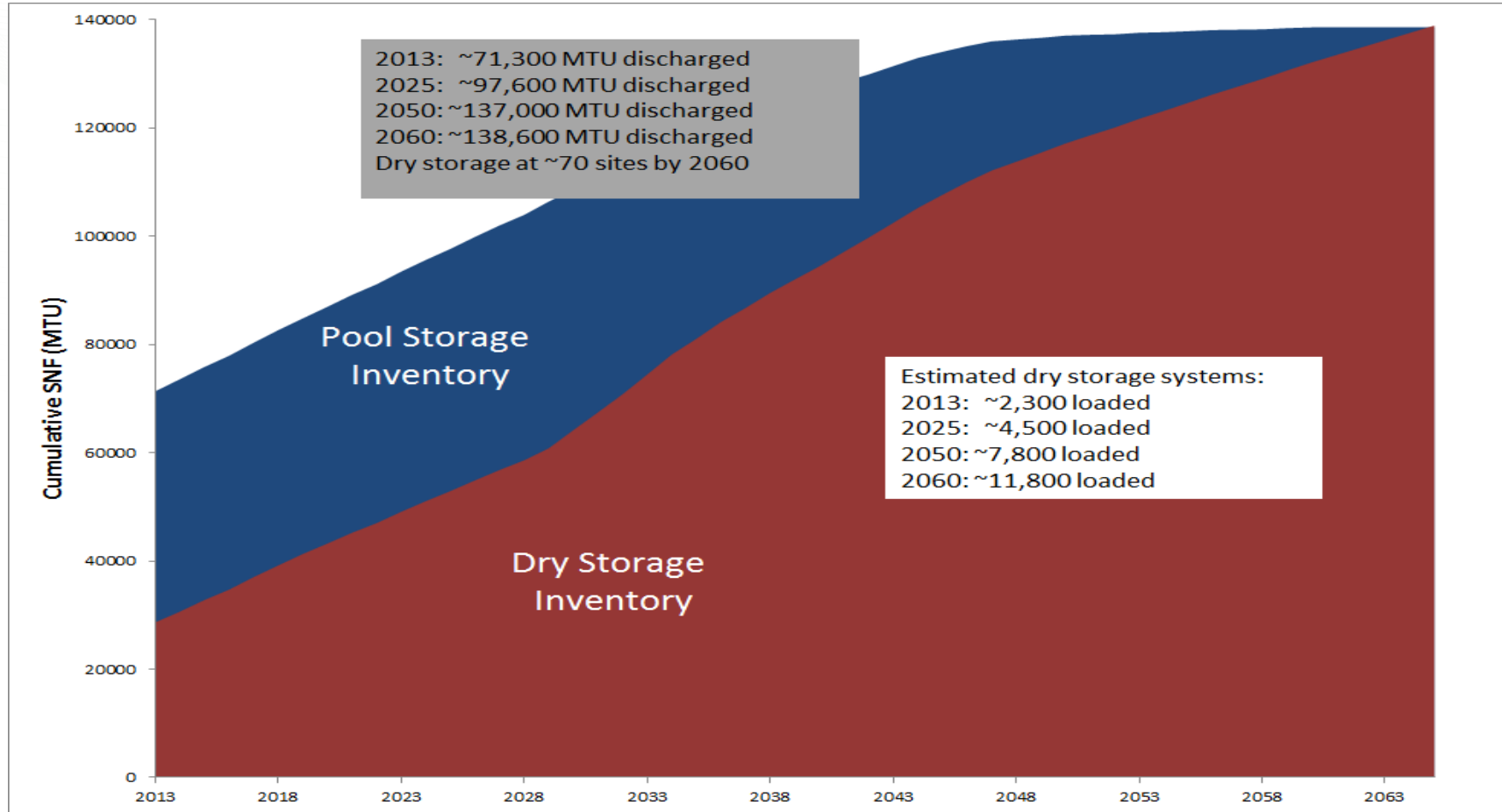
INTEGRATED WASTE MANAGEMENT SYSTEM



Применение системного подхода в США: рассмотрение различных концепций проекта



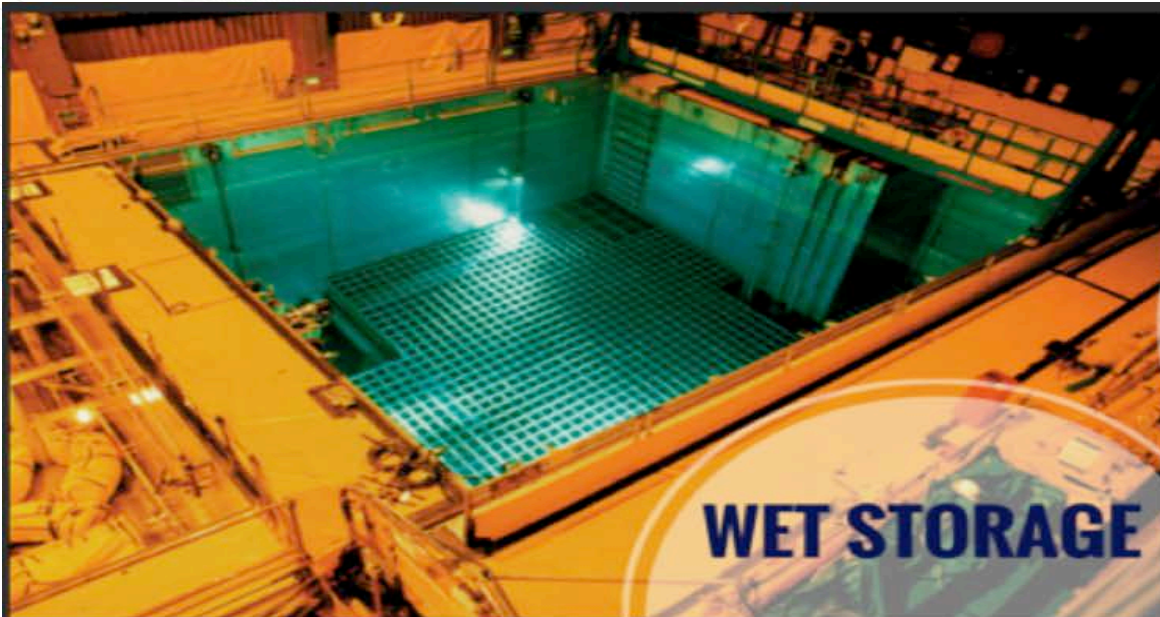
На сегодняшний день в США рассматривают вопрос хранения ОЯТ, так как количество накопленного ОЯТ из промышленных реакторов продолжает расти примерно на 2 тыс. т (метрических тонн тяжелого металла); ежегодно происходит загрузка новых 150-200 чехлов для «сухого» хранения



Современные реакторы эксплуатируются 60 лет, если не объявлен более ранний останов. 5 новых установок эксплуатируются 40 лет. Существующая практика в области хранилищ отработанного ядерного топлива (ХОЯТ).

Источник: По данным «Отчета об инвентаризации ОЯТ и радиоактивных отходов высокого уровня активности из промышленных реакторов», FCRD-NFST-2013-263, Ред. 4, 30 июня 2016 г.

На сегодняшний день ОЯТ хранится как в бассейнах выдержки, так и в системах «сухого» хранения



WET STORAGE

Spent fuel pool at the San Onofre Nuclear Generating Station. Photo courtesy of the Nuclear Regulatory Commission.

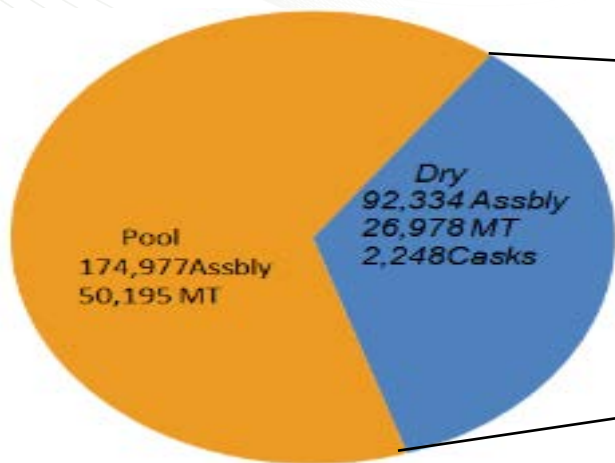
DRY STORAGE



A dry cask loaded with spent fuel being lifted from a horizontal transporter to be placed vertically on a storage pad. Photo courtesy of Sandia National Laboratories.

Существуют различные промышленные системы «сухого» хранения

Плановая выгрузка топлива из реактора в декабре 2016 г. «Сухое» хранилище, май 2016 г.



2032 сварных металлических бака в бетонных упаковках с вентиляцией
82318 ТВС, 89,2% «сухих» хранилищ

Компания Transnuclear (35,2%)
Компания Holtec (49,7%)
Компания NAC (12,9%)

12 сварных металлических баков в транспортных упаковках
866 ТВС, 0,9% «сухих» хранилищ

204 контейнера для ОЯТ с привинчивающимися крышками
9150 ТВС, 9,9% «сухих» хранилищ

- Большую часть ТВС размещают в больших сварных чехлах
- Существуют различные системы «сухого» хранения
- Существует тенденция к увеличению вместимости



Transnuclear TN-32



Holtec Hi-Star 100

Источник: По данным «Отчета об инвентаризации ОЯТ и радиоактивных отходов высокого уровня активности из промышленных реакторов», FCRD-NFST-2013-263, Ред. 4, 30 июня 2016 г. и «Анализ систем «сухого» хранения ОЯТ», FCRD-NFST-2014-000602, Ред. 2, 30 августа 2016 г.

Целями научно-исследовательских работ является заполнение пробелов в знаниях о поведении ОЯТ при хранении и транспортировке

1. Поддержка развития технических основ для демонстрации пригодности ОЯТ для длительного хранения (управление старением материалов)
2. Поддержка развития технических основ для обеспечения возможности извлечения ОЯТ после длительного хранения
3. Поддержка развития технических основ для обеспечения транспортировки ОЯТ с высоким выгоранием



Инициативы, поддерживающие вывоз ОЯТ промышленных реакторов с площадок АЭС, финансируются Управлением ядерной энергетики Министерства энергетики США.

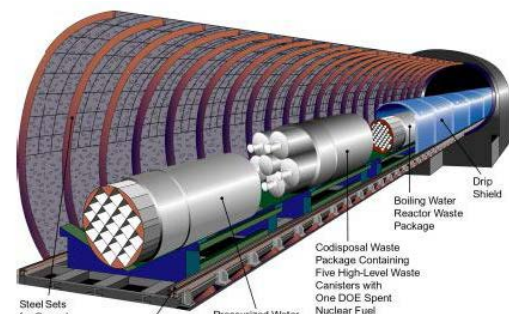
Цель: Выявление альтернативных вариантов и проведение научных исследований и разработки технологии, позволяющей осуществлять хранение, транспортировку и вывоз отработанного ядерного топлива (ОЯТ) и отходов, создаваемых в ходе существующих и будущих циклов ядерного топлива.

Конечные цели Министерства энергетики США включают в себя:

- Улучшение в целом интеграции процесса хранения как части системы обращения с отходами;
- Подготовка к крупномасштабной транспортировке ОЯТ;

В поддержку этих целей необходимо достижение следующих краткосрочных целей по хранению и транспортировке:

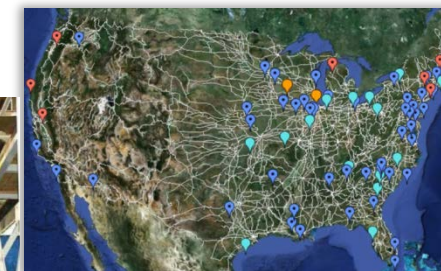
- Поддержка проекта сбора данных по полноценному хранению ОЯТ с высоким выгоранием;
- **Достижение понимания того, как температура и давление оказывают влияние на целостность оболочек ОЯТ с глубоким проектным выгоранием (HBU)**
- **Прогнозное моделирование**
- **Экспериментальные работы**
- **Определение характеристик внешних нагрузок, воздействующих на ОЯТ в ходе его транспортировки в нормальных условиях**



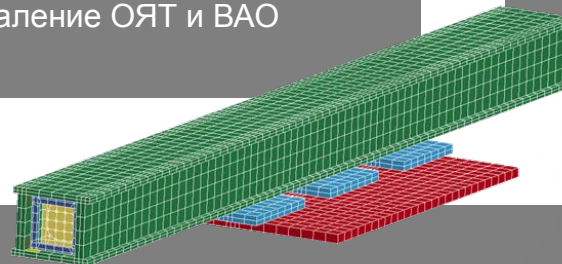
Удаление ОЯТ и ВАО



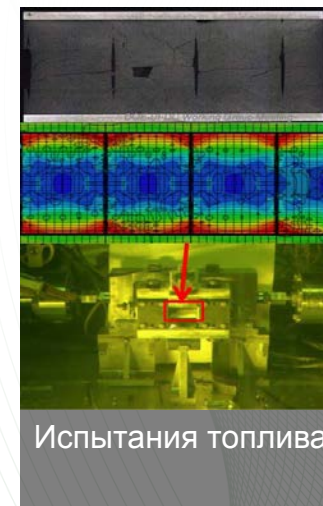
Хранение ОЯТ



Транспортировка ОЯТ



Исследование упрощенной модели топливной сборки

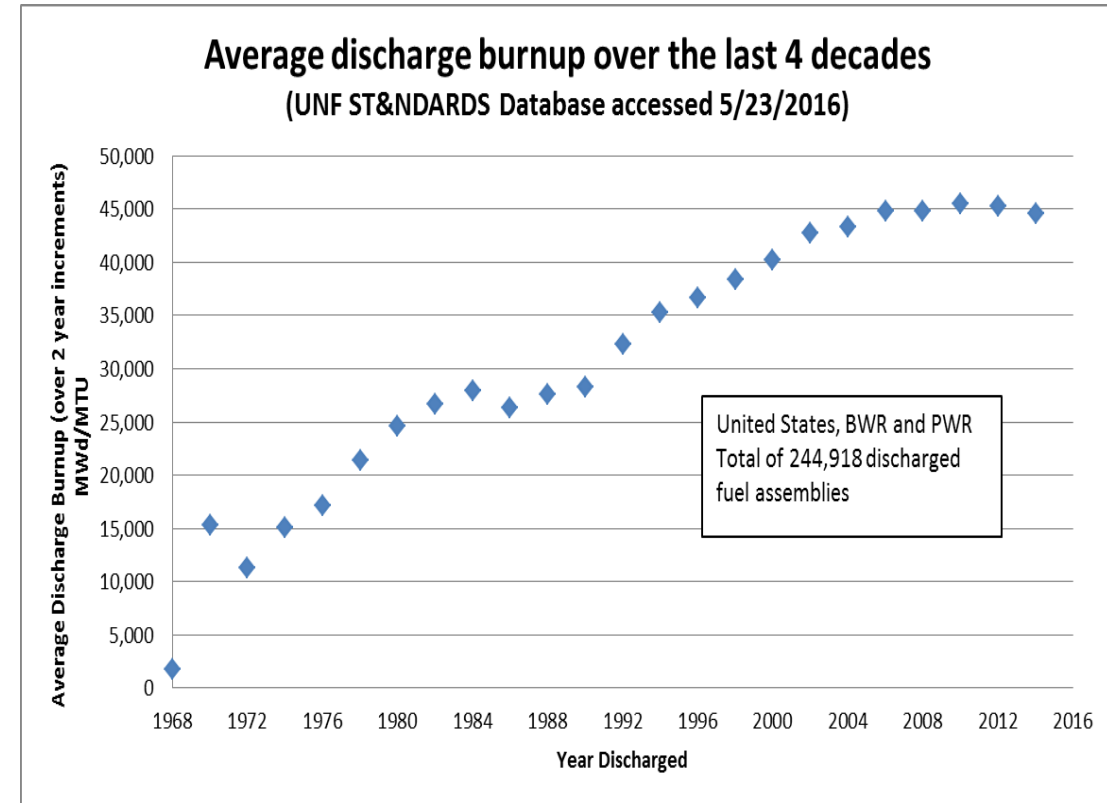


Испытания топлива

*

Одной из технических проблем является то, что средние показатели выгорания топлива отработанных выгружаемых ТВС постоянно росли с момента ввода в эксплуатацию первого реактора

- Тем не менее, в открытом доступе весьма мало данных о свойствах ОЯТ с высоким выгоранием
- В США среднее выгорание топлива в ТВС стабилизировалось на уровне примерно 45 ГВт·сут./т урана, а максимальные показатели выгорания топлива в ТВЭЛах находятся на уровне около 58 ГВт·сут./т урана.
- Согласно данным Института ядерной энергии на 2012 г., «сухое» хранение ОЯТ с высоким выгоранием (> 45 ГВт·сут./т урана) начало применяться в последнее десятилетие
 - АЭС Мейн Янки, запуск в 2003 г., до 49,5 ГВт·сут./т урана
 - АЭС Робинсон, запуск в 2005 г., до 56,9 ГВт·сут./т урана
 - АЭС Окони, запуск в 2006 г., до 55 ГВт·сут./т урана
 - АЭС Сарри и Норт Анна, запуск в 2007 г., до 56,1 ГВт·сут./т урана



Среднее выгорание топлива в ТВС, выгружаемых из промышленных энергетических реакторов в США, за последние четыре десятилетия (ОРНЛ)

Таким образом, запущенный в США проект сбора данных по ОЯТ с высоким выгоранием позволит экспериментально определить влияние длительного хранения и транспортировки на ОЯТ с высоким выгоранием и получить недостающие сведения

- Контейнер TN-32 с ОЯТ с высоким выгоранием, загруженный в 2017 г. и подлежащий открытию в 2027 г. или позднее
- 25 «идентичных» ТВЭЛОВ (ТВЭЛОВ одинаковой конструкции с аналогичной историей эксплуатации) отправлены в ОРНЛ для основных испытаний
- Данные, которые необходимо собрать для проекта, включают в себя:
 - Начальное состояние ТВЭЛОВ с высоким выгоранием с аналогичной историей облучения перед сушкой, транспортировкой и хранением
 - **Влияние сушки, транспортировки и хранения на ТВЭЛЫ с высоким выгоранием**
 - **Механические свойства ТВЭЛОВ с высоким выгоранием при «сухом» хранении**
 - **Влияние нагрузок при погрузочно-разгрузочных операциях и транспортировке на топливную систему в комплексе**
 - **Вдыхаемые летучие фракции из ОЯТ с высоким выгоранием**

1	6T0 Zirlo, 54.2 GWd 4.25%, 3cy, 11yr	2 (TC Lance) 3K7 M5, 53.4 GWd 4.55%, 3cy, 8yr	3 3T6 Zirlo, 54.3 GWd 4.25%, 3cy, 11yr	4 6F2 Zirlo, 51.9 GWd 4.25%, 3cy, 13yr	DRAIN PORT	
5	3F6 Zirlo, 52.1 GWd 4.25%, 3cy, 13yr	6 (TC Lance) 30A M5, 52.0 GWd 4.55%, 3cy, 6yr	7 22B M5, 51.2 GWd 4.55%, 3cy, 5 yr	8 20B M5, 50.5 GWd 4.55%, 3cy, 5 yr	9 5K6 M5, 53.3 GWd 4.55%, 3cy, 8yr	10 5D5 Zirlo, 55.5 GWd 4.2%, 3cy, 17yr
11 Vent Port 5D9 Zirlo, 54.6 GWd 4.2%, 3cy, 17yr	12 28B M5, 51.0 GWd 4.55%, 3cy, 5 yr	13 F40 Zirc-4, 50.6 GWd 3.59%, 3cy, 30yr	14 (TC Lance) 57A M5, 52.2 GWd 4.55%, 3cy, 6yr	15 30B M5, 50.6 GWd 4.55%, 3cy, 5 yr	16 3K4 M5, 51.8 GWd 4.55%, 3cy, 8 yr	
17 5K7 M5, 53.3 GWd 4.55%, 3cy, 8yr	18 50B M5, 50.9 GWd 4.55%, 3cy, 5 yr	19 (TC Lance) 3U9 Zirlo, 53.1 GWd 4.45%, 3cy, 10yr	20 0A4 Low-Sn Zy-4, 50 GWd 4.0%, 2cy, 22yr	21 15B M5, 51.0 GWd 4.55%, 3cy, 5 yr	22 6K4 M5, 51.9 GWd 4.55%, 3cy, 8 yr	
23 3T2 Zirlo, 55.1 GWd 4.25%, 3cy, 11yr	24 (TC Lance) 3U4 Zirlo, 52.9 GWd 4.45%, 3cy, 10yr	25 56B M5, 51.0 GWd 4.55%, 3cy, 5 yr	26 54B M5, 51.3 GWd 4.55%, 3cy, 5 yr	27 6V0 M5, 53.5 GWd 4.4%, 3cy, 8yrs	28 (TC Lance) 3U6 Zirlo, 53.0 GWd 4.45%, 3cy, 10yr	
29 4V4 M5, 51.2 GWd 4.40%, 3cy, 8yr	30 5K1 M5, 53.0 GWd 4.55%, 3cy, 8yr	31 (TC Lance) 5T9 Zirlo, 54.9 GWd 4.25%, 3cy, 11yr	32 4F1 Zirlo, 52.3 GWd 4.25%, 3cy, 13yr			



Контейнер TN-32В для проекта сбора данных по ОЯТ с высоким выгоранием

Каждый квадрат соответствует ячейке корзины контейнера и содержит идентификатор ячейки в левом верхнем углу и идентификационные характеристики ТВС:

- Идентификатор ячейки / измерительные инструменты контейнера (трубки для термомпар)
 - Идентификатор ТВС
 - Материал оболочки, среднее выгорание топлива в ТВС
 - начальное обогащение, циклы выгорания, время выдержки.
- Красная граница** = размещенная в контейнере ТВС с ТВЭЛами, считающихся «идентичными» для одного или более из 25 выбранных «идентичных» ТВЭЛОВ
- Оранжевая граница** = ТВС, из которых позаимствованы «идентичные» ТВЭЛы

* Красный цвет соответствует данным, которые будут получены в результате экспериментов с ОЯТ в ОРНЛ

Основные испытания ОЯТ проводятся в ОРНЛ. Будут исследованы двадцать пять «идентичных» ТВЭЛов для сравнения их состояния с состоянием ТВЭЛов после хранения в контейнере (в соответствии с проектом)

- «Идентичные» ТВЭЛы поступили в ОРНЛ в январе 2016 г.
- «Идентичные» ТВЭЛы имеют сходные характеристики (одинаковую конструкцию и аналогичную историю эксплуатации) с ТВЭЛами, которые будут помещены в «проектный» контейнер, так как они были извлечены из ТВС сходной конструкции и со сходной историей эксплуатации («симметричные партнеры») или из конкретных ТВС, которые будут помещены в «проектный» контейнер
- Будут исследованы двадцать пять ТВЭЛов с глубоким проектным выгоранием из 7 промышленных ТВС типа 17x17, находившихся в эксплуатации в реакторе АЭС «Норт Анна» (компания-оператор – Dominion)
 - 9 топливных стержней M5™
 - 12 топливных стержней Zirlo®
 - 2 стержня из сплава Zr-4 с низким содержанием олова
 - 2 стержня из сплава Zircaloy-4



Вверху: Техники АЭС Норт Анна компании-оператора Dominion готовят транспортный контейнер, содержащий топливные стержни из топливных сборок с глубоким проектным выгоранием (НВУ), к отгрузке в адрес ОРНЛ.
<http://eprijournal.com/spent-nuclear-fuel-storage-demo-heats-up/>

Справа: Транспортный контейнер перемещается в загрузочный отсек горячей камеры лаборатории по исследованию облученного топлива (IFEL) в ОРНЛ.



После неразрушающего контроля последует разрушающий контроль, который будет включать в себя целый ряд испытаний для сравнительного анализа с состоянием перед размещением ОЯТ с глубоким проектным выгоранием (HBU) на хранение

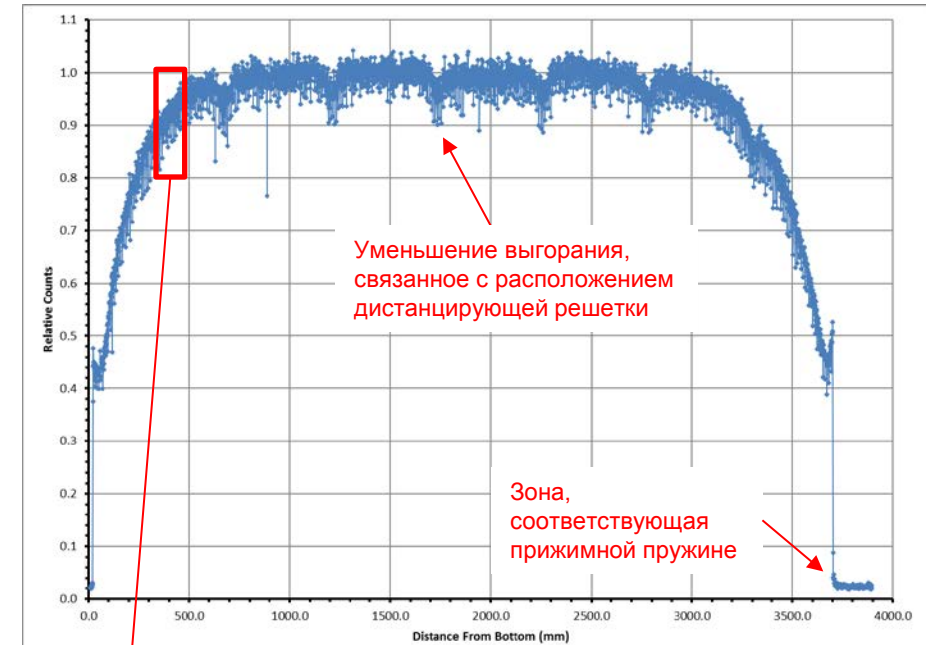
- Разрушающий контроль начинается с прокалывания топливного стержня, отбора пробы газа и разделения стержня на сегменты
- При прокалывании каждого топливного стержня будет проводиться измерение внутреннего давления топливного стержня (RIP)
 - Давление будет измеряться как функция времени для оценки свободы перемещения газа через набор топливных таблеток
 - При этом определяется состав газообразных продуктов деления, молярное количество каждого из присутствующих газов и свободный объем топливного стержня
 - Образец газа будет подвергнут анализу для определения основных изотопов газообразных продуктов деления
- Некоторые из 25 «идентичных» топливных стержней могут быть оставлены в резерве для последующего использования
- Некоторые из топливных стержней или сегментов топливных стержней могут быть подвергнуты термообработке для имитации условий сушки контейнера

Требуемые механические испытания все еще подлежат уточнению, при этом рассматривается возможность проведения нескольких взаимно дополняющих и перекрывающихся испытаний. Также запланированы механические испытания при различных температурах.

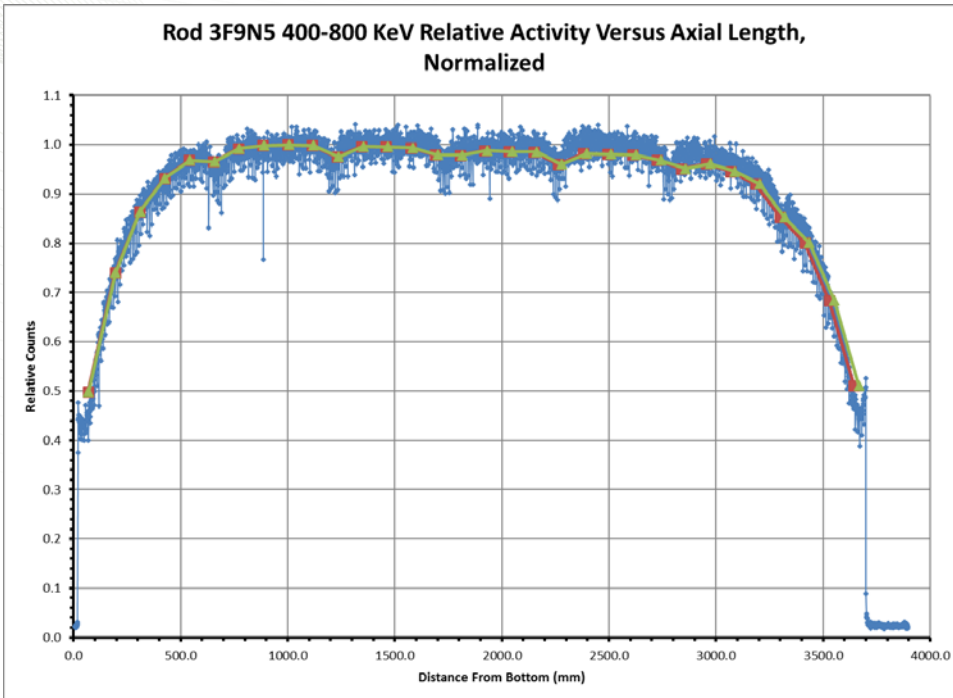
- Предложенные испытания рассматриваются и распределяются по степени приоритетности, и могут включать следующее:
 - **Сегменты с топливом**
 - Оптический контроль, включающий в себя металлографические исследования и исследования сканирующим электронным микроскопом (СЭМ)
 - Устойчивость к скручиванию при спиральном надрезе (SNTT)
 - Система усталостных испытаний циклическим противонаправленным изгибом (CIRFT)
 - Четырехточечный изгиб
 - Испытания окружным сжатием
 - **Оболочка после извлечения топлива**
 - Анализ содержания водорода в оболочке (метод горячей экстракции)
 - Испытание трубки на прочность при растяжении (осевом) и разрыв
 - Испытания окружным сжатием
 - Испытание расширяющимся клином
 - Испытания для определения твердости

Гамма-сканирование было проведено в соответствии с планом. В настоящее время в ОРНЛ проводится профилометрия.

- Измерения проводились для каждого ТВЭЛа отдельно
- Цель состоит в определении общего аксиального профиля выгорания ТВЭЛа и выявлении возможных значительных зазоров между топливными таблетками
- Были получены данные для отдельных точек, расположенных вдоль оси ТВЭЛа с интервалом 1 мм
- Для измерений в интервале 400-800 кэВ был использован детектор на основе NaI
- Данный детектор не откалиброван по стандарту, поэтому все измеренные значения являются относительными
- Топливные таблетки испускают гамма-кванты, поэтому можно наблюдать каждую топливную таблетку
- Видны зоны уменьшения выгорания, связанные с расположением дистанцирующих решеток
- Возможно идентифицировать зону расположения прижимной пружины, но невозможно идентифицировать зоны расположения концевых деталей



Предварительные результаты гамма-сканирования



Тип ТВС: NAIF/P+Z

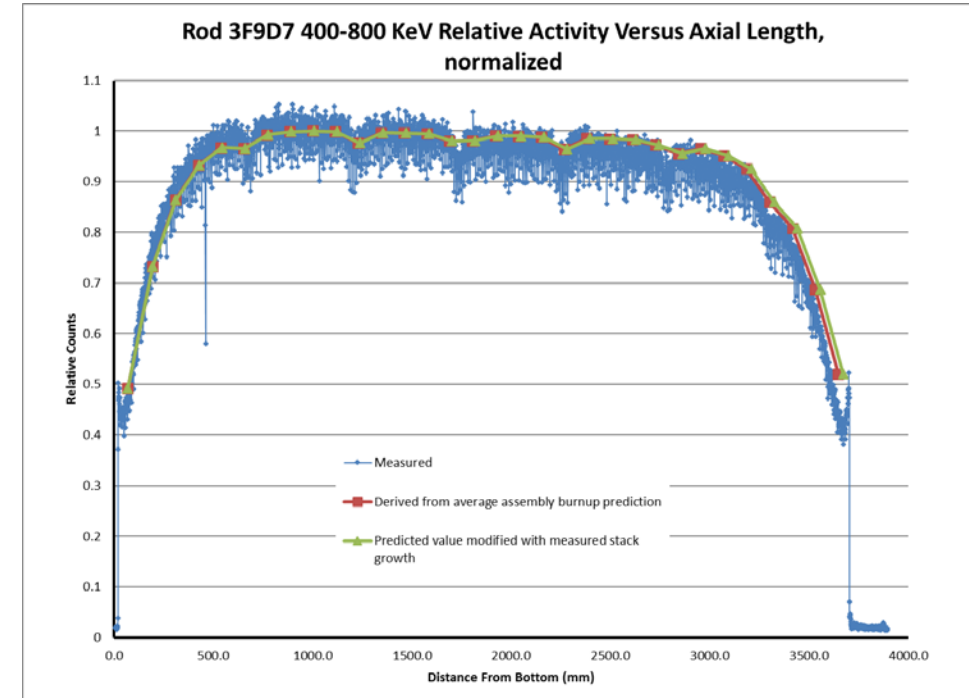
Тип оболочки: Zirlo

Среднее выгорание ТВЭЛа / среднее выгорание ТВС:
1,027

Распухание топливного сердечника: 0,640%

Распухание ТВЭЛа: 0,402%

Показатели отклонений: возможный зазор в топливном сердечнике в позиции 800 мм



Тип ТВС: NAIF/P+Z

Тип оболочки: Zirlo

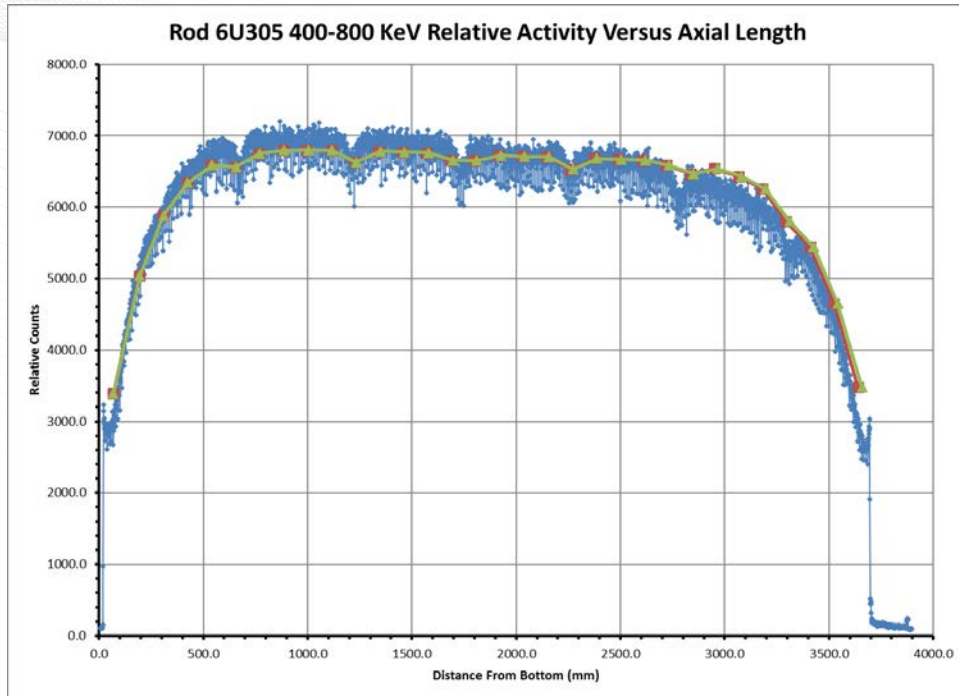
Среднее выгорание ТВЭЛа / среднее выгорание ТВС:
1,016

Распухание топливного сердечника: 0,722%

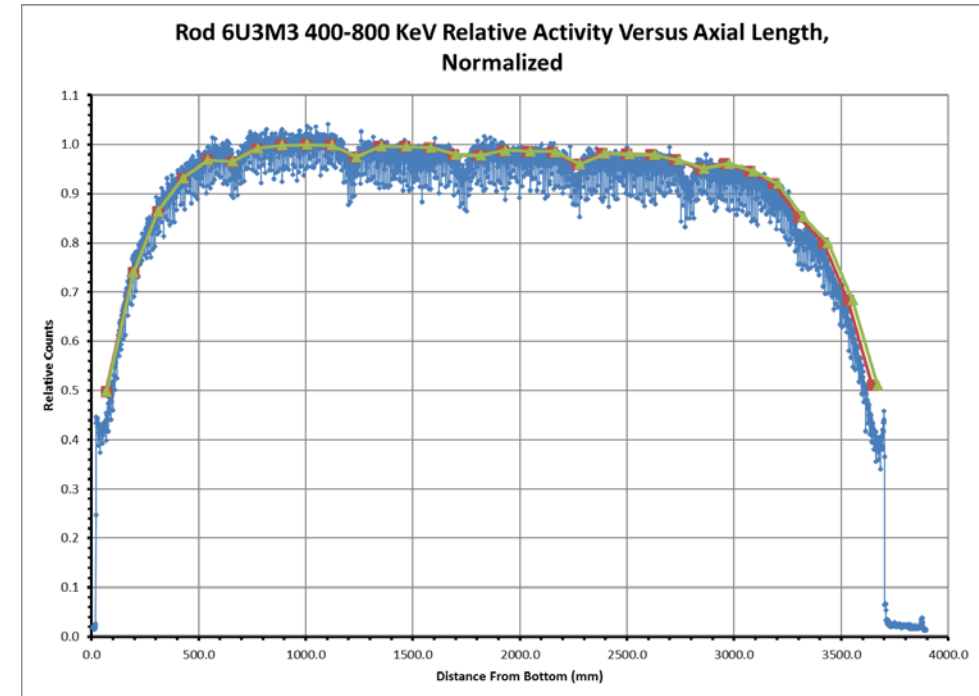
Распухание ТВЭЛа: 0,351%

Показатели отклонений: возможный зазор в топливном сердечнике в позиции 462 мм

Предварительные результаты гамма-сканирования

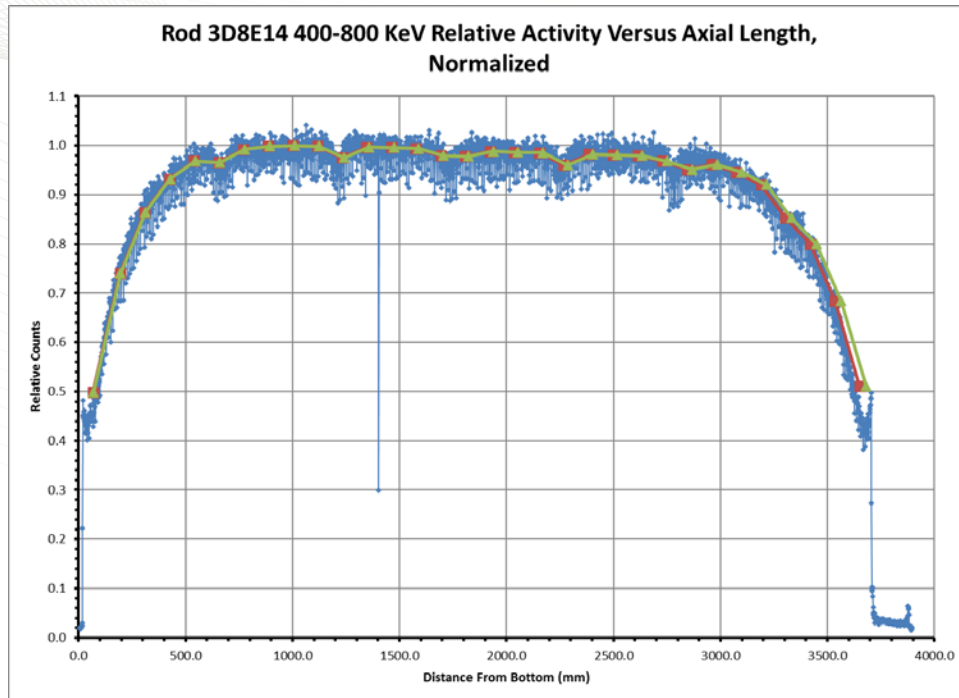


Тип ТВС: NAIF/P+Z
Тип оболочки: Zirlo
Среднее выгорание ТВЭЛа / среднее выгорание ТВС: 1,004
Распухание топливного сердечника: 0,503%
Распухание ТВЭЛа: 0,362%
Показатели отклонений: нет



Тип ТВС: NAIF/P+Z
Тип оболочки: Zirlo
Среднее выгорание ТВЭЛа / среднее выгорание ТВС: 1,000
Распухание топливного сердечника: 0,667%
Распухание ТВЭЛа: 0,405%
Показатели отклонений: нет

Предварительные результаты гамма-сканирования



Тип ТВС: NAIF/P+Z

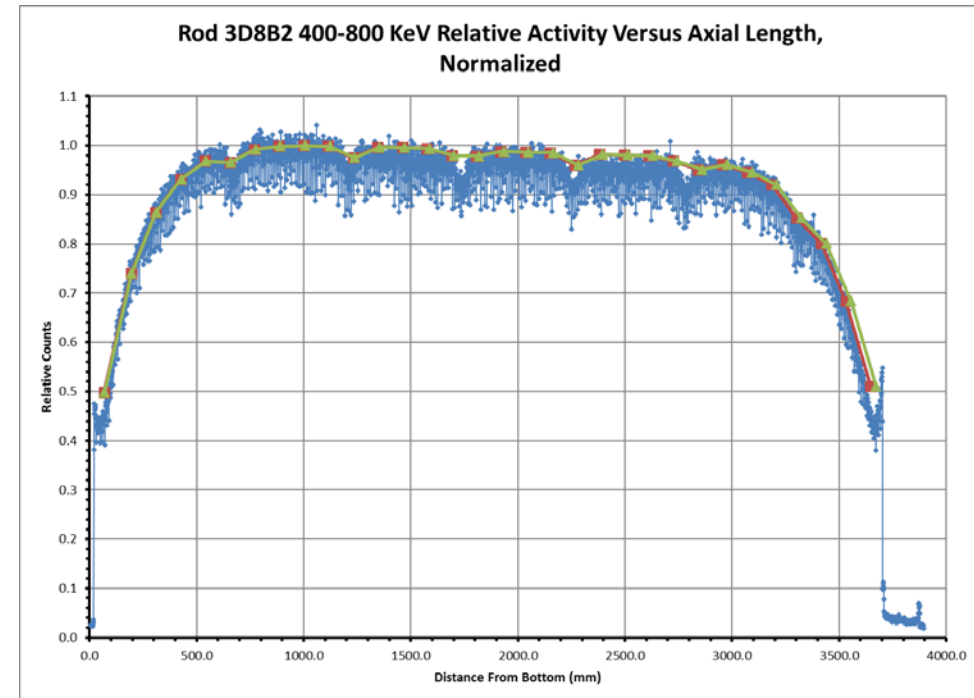
Тип оболочки: Zirlo

Среднее выгорание ТВЭЛа / среднее выгорание ТВС: 1,042

Распухание топливного сердечника: 0,804%

Распухание ТВЭЛа: 0,448%

Показатели отклонений: возможный зазор в топливном сердечнике в позиции около 1400 мм



Тип ТВС: NAIF/P+Z

Тип оболочки: Zirlo

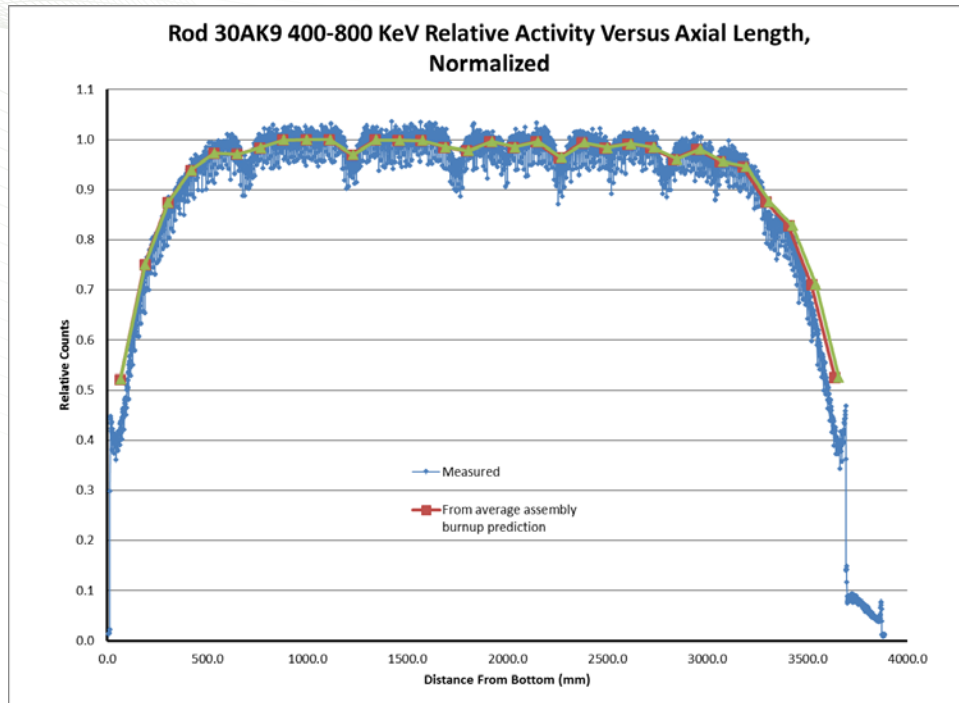
Среднее выгорание ТВЭЛа / среднее выгорание ТВС: 1,002

Распухание топливного сердечника: 0,694%

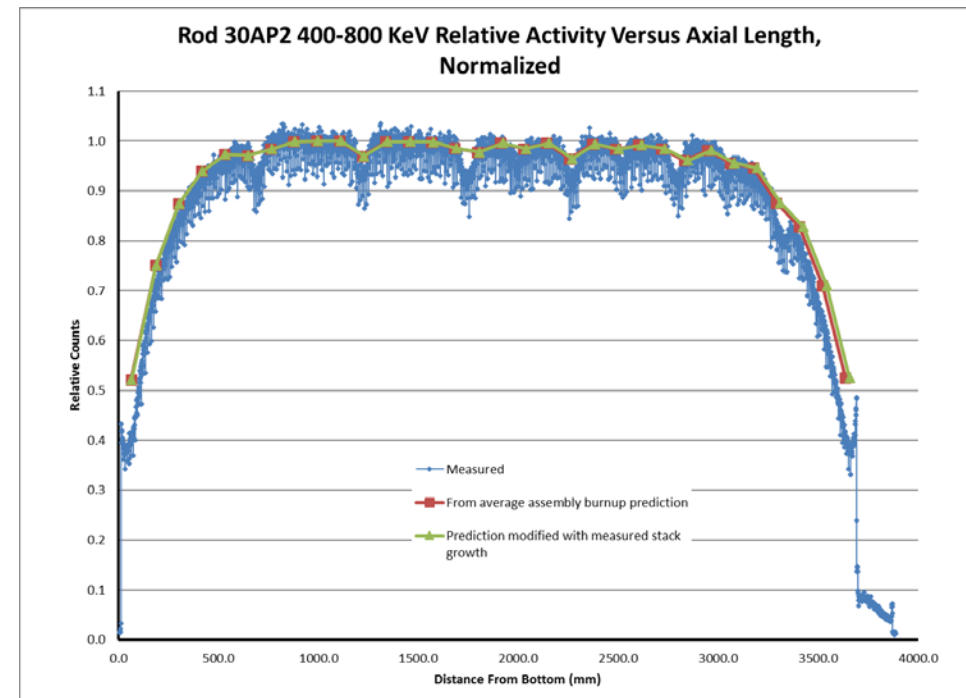
Распухание ТВЭЛа: 0,340%

Показатели отклонений: нет

Предварительные результаты гамма-сканирования



Тип ТВС: AMBW
Тип оболочки: M5
Среднее выгорание ТВЭЛа / среднее выгорание ТВС: 1,008
Распухание топливного сердечника: 0,585%
Распухание ТВЭЛа: 0,415%
Показатели отклонений: нет



Тип ТВС: AMBW
Тип оболочки: M5
Среднее выгорание ТВЭЛа / среднее выгорание ТВС: 0,949
Распухание топливного сердечника: 0,585%
Распухание ТВЭЛа: 0,422%
Показатели отклонений: нет

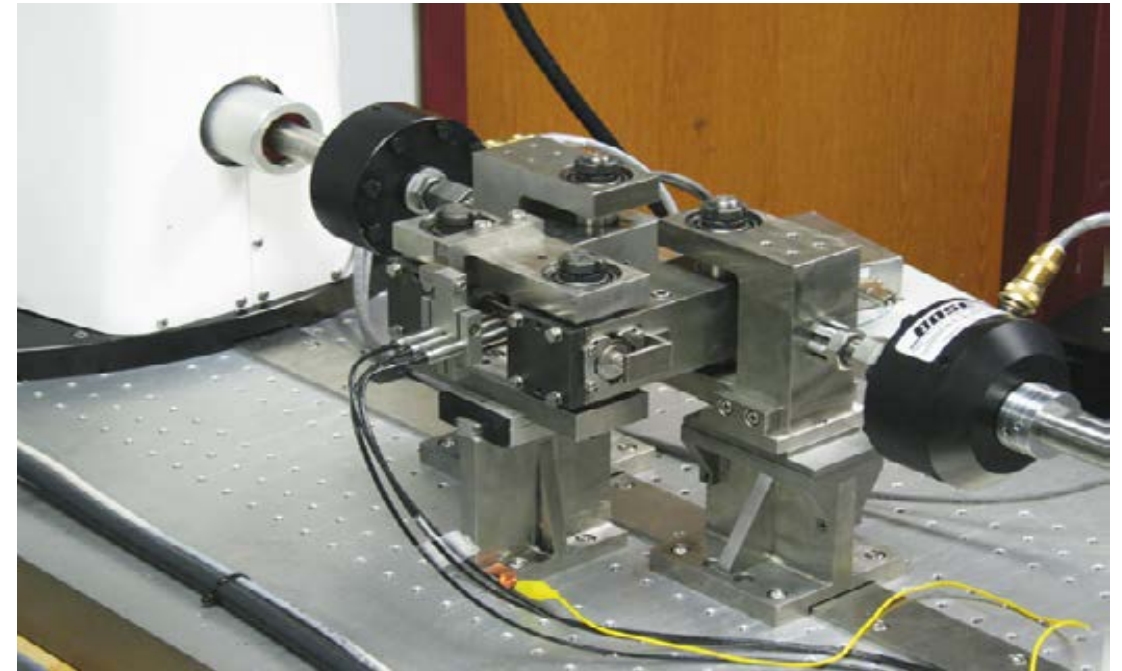
Заключение: США планируют провести окончательную консолидацию ОЯТ и выполняют исследования для сбора необходимых данных. Долгосрочные цели программы включают в себя следующие пункты:

- Поддержка использования полномасштабного демонстрационного объекта хранения ОЯТ (лицензированного Комиссией по ядерному регулированию) при сотрудничестве с представителями атомной отрасли
- **Разработка технического обоснования, необходимого для обеспечения окончательной транспортировки ОЯТ (в т. ч. ОЯТ с высоким выгоранием)**
 - **Заполнение пробелов в технических знаниях по долгосрочному «сухому» хранению**
- Поддержка развития Министерством энергетики США комплексной системы обращения с ядерными отходами с вытекающим из этого применением комплексных концепций хранения, транспортировки и утилизации

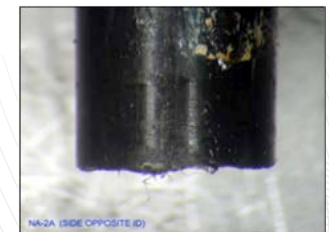
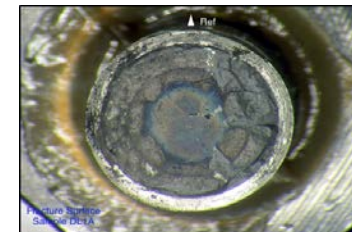
Дополнительные слайды

Система усталостных испытаний циклическим противонаправленным изгибом (CIRFT) позволит определить информацию о совокупном воздействии на систему стержней с топливом во время транспортировки

- Минимум 3 испытания на каждый топливный стержень:
 - Усталостный ресурс (динамический)
 - Механические характеристики (статические)
 - Влияние ударов / воздействий на усталостный ресурс (динамический)
- Позволяет определить:
 - **Характеристику циклов нагружения (кривую усталости)**
 - **Усталостная прочность**
 - Изгибная прочность
 - Модуль Юнга
 - Предел прочности при растяжении
- Кроме того, при этом испытании будет проводиться сбор и количественный анализ всех аэрозолей топлива, выпускаемых при разрыве

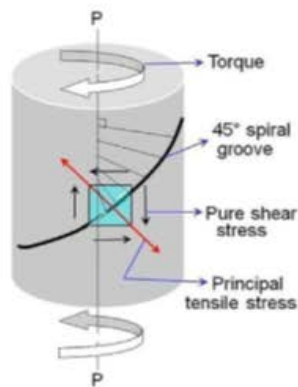


Система усталостных испытаний циклическим противонаправленным изгибом (CIRFT)



Устойчивость к скручиванию при спиральном надрезе (SNTT) позволит измерить параметры вязкости разрушения композитной системы таблеток/оболочки

- Позволяет предсказать рабочие характеристики топлива в динамических условиях
- Позволяет определить:
 - Вязкость разрушения,
 - Эффективность связей поверхностей
 - Жесткость при скручивании
 - Устойчивость к сдвигу/ модуль сдвига
 - Модуль Юнга
 - Температура перехода из пластичного состояния в хрупкое (DBTT)



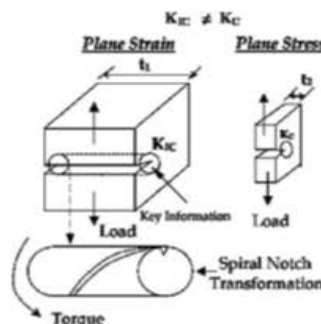
a) schematic of the theory



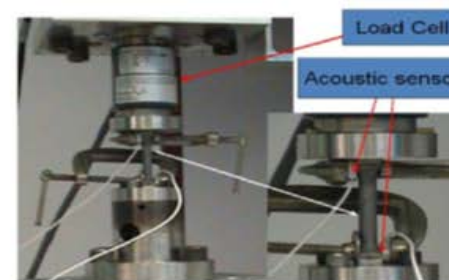
b) SNTT fracture test setup



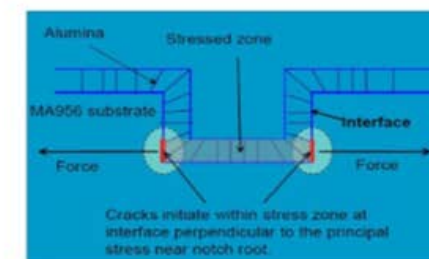
c) halves of tested A533B1 specimens



d) CT and SNTT specimens



e) SNTT coating test setup



f) U-grooved spiral coating test

Теоретические основы измерения устойчивости к скручиванию при спиральном надрезе (SNTT) и испытательное оборудование

Испытания окружным сжатием (RCT) моделирует нагрузки типа «защемления», воздействующие на пружины дистанцирующих решеток, и возможные контакты топливных стержней с другими топливными стержнями или со стенками корзины контейнера

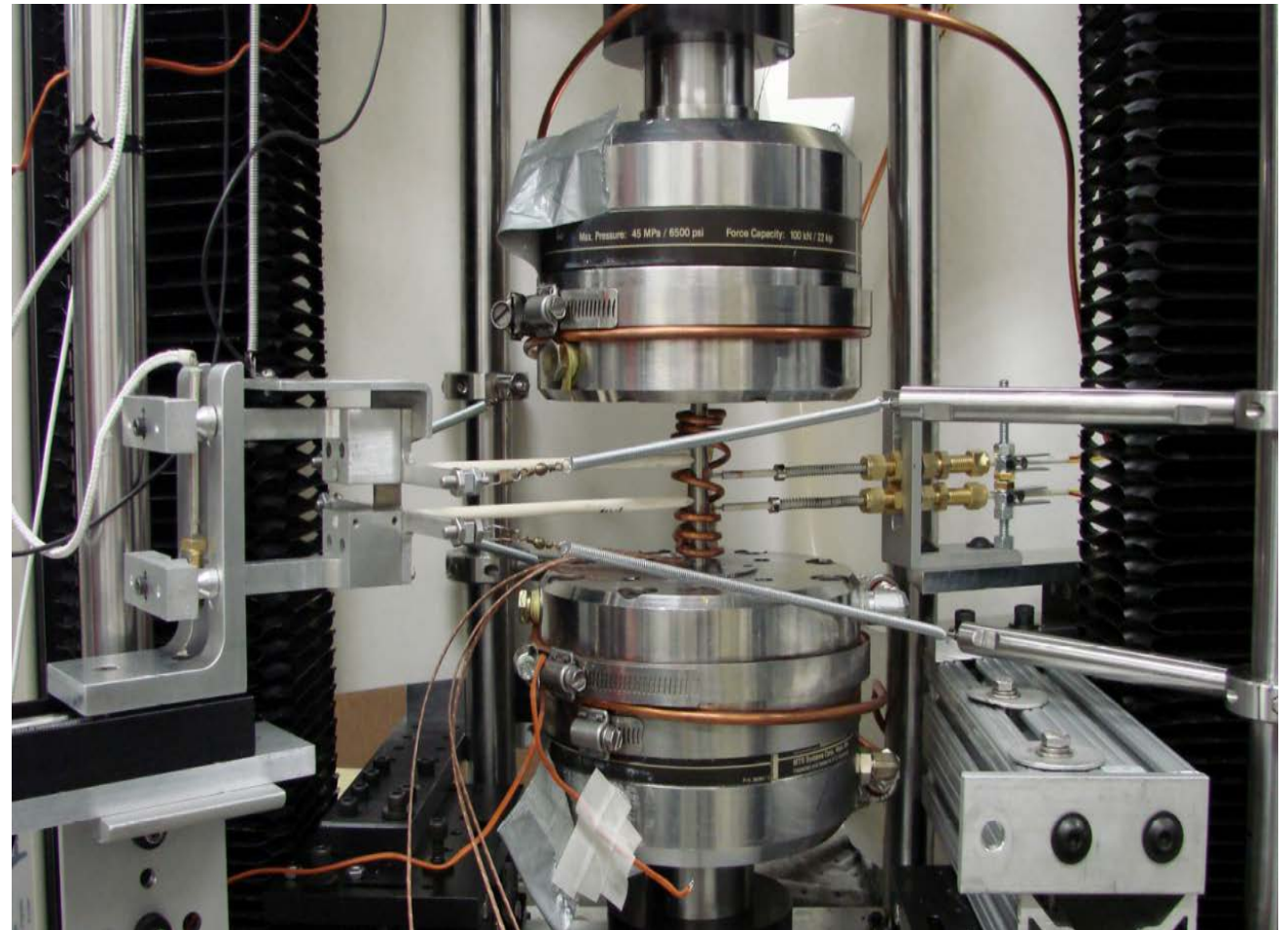
- Планируется создать базу данных для образцов стержней с топливом для сравнения с результатами испытаний для стержней без топлива, проводимых в Аргонской национальной лаборатории, в результате которых будут получены следующие данные:
 - Температура перехода из пластичного состояния в хрупкое (испытания без топлива)
 - Напряжение/растяжение при радиальном сжатии
 - Предел текучести при радиальном сжатии
 - Модуль Юнга при радиальном сжатии
- Моделирование условий сушки позволит оценить влияние переориентации гидридов



(b) Photograph of Instron 8511 with ring sample

Испытание трубки на прочность при растяжении (осевом) позволяет определить свойства материала оболочки (без топлива)

- По результатам этих испытаний собирается следующая информация:
 - Предел текучести
 - Предел прочности при растяжении
 - Однородное удлинение
 - Суммарное удлинение
 - Модуль Юнга
 - Коэффициент Пуассона
 - Деформационное упрочнение
- Испытания могут проводиться при различных температурах



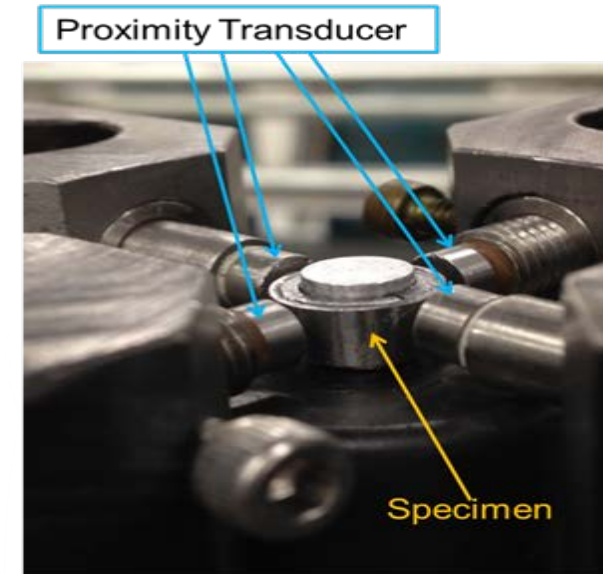
Стенд для испытаний на прочность при растяжении (в конфигурации для высокотемпературных испытаний)

Испытание расширяющимся клином позволяют определить поперечные (при растяжении) свойства материала оболочки при растяжении

- Методика испытаний:
 - Используются 4 клина из упрочненной стали и алюминиевая вставка. При нагружении вставка обеспечивает радиально направленные растягивающие напряжения в кольцевой оболочке.
 - Данные зависимости радиального перемещения от нагрузки преобразуются в зависимости от окружного напряжения и растяжения.
 - Испытание будет проводиться при интересующей температуре
- Позволяет определить поперечные свойства при растяжении:
 - **Предел текучести**
 - **Режим деформационного упрочнения материала оболочки**
 - Предел прочности при растяжении
 - Модуль Юнга
- Эти результаты также позволяют подтвердить результаты анализа температуры перехода из пластичного состояния в хрупкое (DBTT)



MTS electro-magnetic load frame



Four Proximity Transducer



(Слева) Вид сбоку, (Справа) Вид сверху испытываемого образца