



# Разработка ядерного топлива для реакторов нового поколения – ошибки и достижения

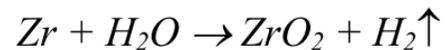
Коновалов Игорь Иванович, д.ф.-м.н., зам. директора ИПЯТ

# Толерантное топливо – миф, или реальность?



Основная проблема существующего топлива водо-водяных реакторов, составляющих основу нынешней АЭ, – применение Zr в качестве конструкционного материала.

При аварийном перегреве Zr сплавов они начинают просто «гореть» в паре с выделением водорода.



Соотношение потенциальных источников тепла в а.з. ВВЭР (1 сутки)



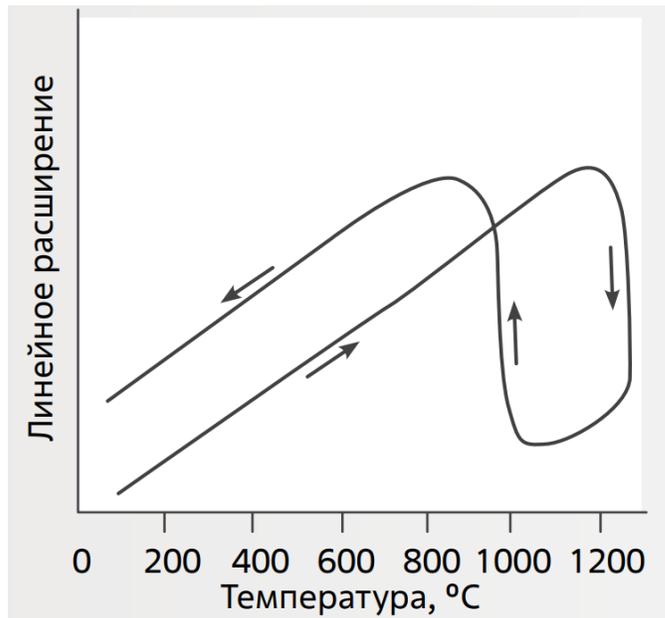
Наибольшую потенциальную опасность представляют:

- Окисление Zr
- Остаточное тепловыделение

# Толерантное топливо – миф, или реальность?

После Фукусимы 2011 года, под контролем США стартовала международная программа по ATF.

Первоначальный термин ATF (Accident Tolerant Fuel – топливо, устойчивое к авариям) был преобразован в EATF (Enhanced Accident Tolerant Fuel – топливо с улучшенным поведением при авариях), поскольку физико-химические свойства Zr не могут обеспечить его приемлемое поведение при перегревах.



Вся коррозионная стойкость Zr держится на микронной защитной оксидной пленке.

Однако при температуре 1200 °C она испытывает фазовое превращение, приводящее к ее разрушению.

Основной американский критерий для EATF – стойкость Zr оболочек при температурах до 1200 °C, хотя все аварии, происходили при более высоких температурах.

# Толерантное топливо – миф, или реальность?

Старт проамериканской программы по ATF инициировал много «мусора» в научных публикациях, например использование новых видов топлива ( $UN$ ,  $U_3Si_2$ ) и материала оболочек (Фехраль, никелевые сплавы, трехслойные металлические композиты с  $Mo$ , композит  $SiC$ ).

Анализ этих направлений показал, что в воде и паре неприменим ни один из вариантов.

С точки зрения коррозионной стойкости :

- Урановые сплавы (образованию взрывоопасного  $H_2$ )
- Соединение  $UN$  (образование взрывоопасного аммиака  $NH_4$ )
- Углерод-содержащие материалы склонны к образованию взрывоопасных газов  $CH_4$ ,  $CO$  (важно для  $SiC$ ,  $UC$ )
- Кремний-содержащие материалы склонны к образованию полу-растворимых в воде кремнистых кислот  $nSiO_2 \cdot mH_2O$  (важно для  $SiC$ ,  $U_3Si_2$ ) и взрывоопасных газов  $SiH_4$

С точки зрения радиационной стойкости:

- Низкотемпературное охрупчивание оболочек из Фехралей при НУ эксплуатации
- Высокотемпературное охрупчивание никель-содержащих сплавов при аварийных перегревах за счет распада метастабильного твердого раствора и накопления радиогенного гелия на  $Ni$ .

# Толерантное топливо – миф!

Анализ показывает, что направление EATF вызвано не столько декларированной целью повышения устойчивости топлива к авариям, сколько борьбой США за рынки ядерного топлива.

В тот момент российский Zr по примесному составу (фторидная технология) уступал зарубежному (хлоридная технология), что сейчас для России уже не является проблемой.

Основными текущими направлениями по созданию EATF за рубежом являются уже проверенные решения, как правило, многолетней давности. При этом там не торопятся с разработкой альтернативных оболочечных и топливных материалов.

Прогноз сделанный 3 года назад полностью подтвердился в том, что в качестве основных направлений EATF за рубежом будут:

- Оксидное топливо с увеличенным размером зерна (в России проблема решена)
- Cr-покрытия на Zr-оболочках (в России проходят испытания)

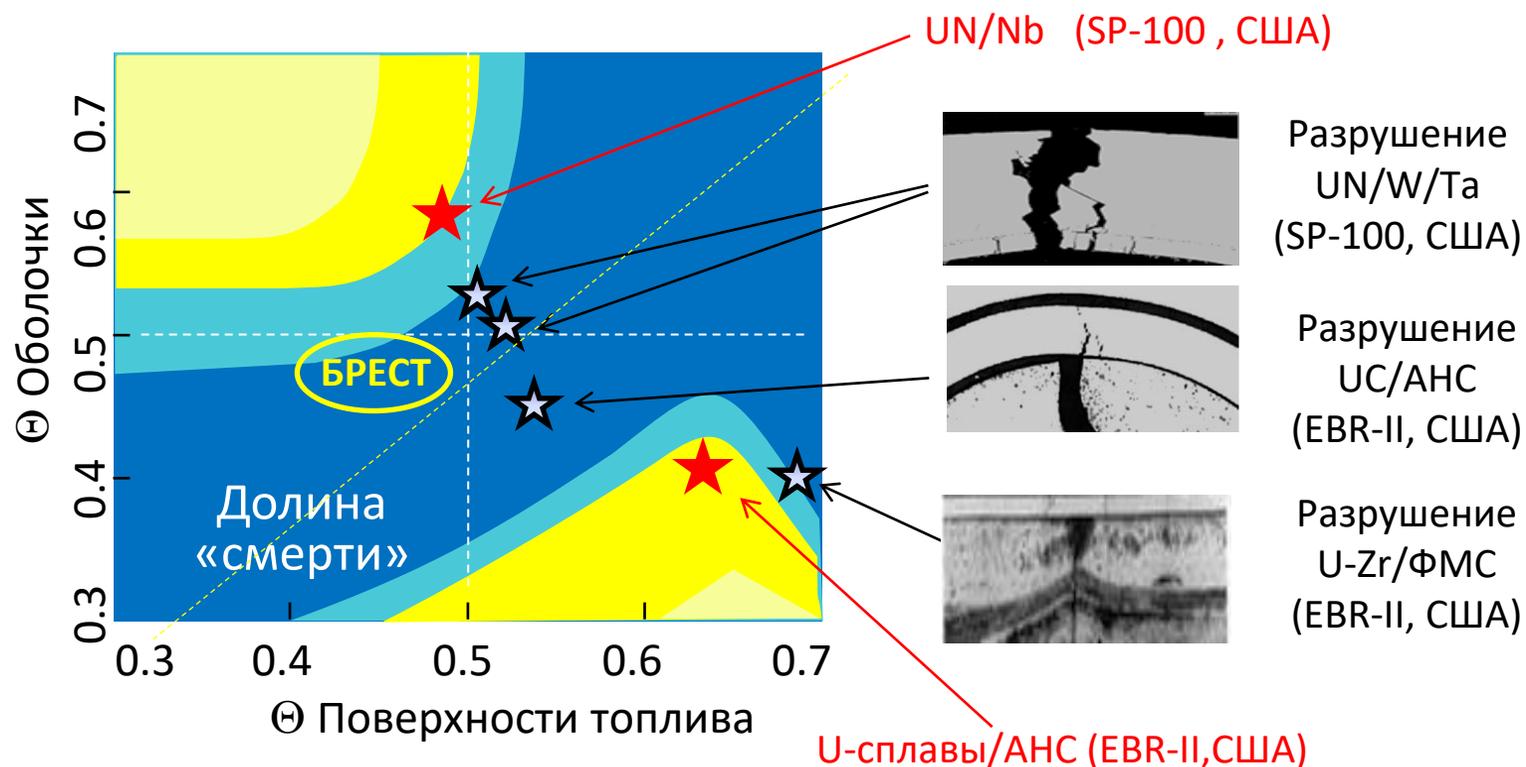
Кстати Cr-покрытия «вещь» в себе (образование эвтектики с Zr при 1330 °C) и образование гидридов на границе раздела покрытие/Zr-оболочка.

# Проблемы конструкционных и топливных материалов для перспективных РБН с плотным топливом

В РБН основное значение имеет характер взаимодействия на стадии МВТО разнородных компонент твэла при их «внутренней» деформации за счет распухания.

Примитивный анализ показывает, что для стадии МВТО компоненты твэла должны иметь разные гомологические температуры ( $\theta = T/T_m$  в К). Что-то должно «поддаваться».

Твэлы реактора БРЕСТ находятся в зоне «риска».



# Проблемы конструкционных и топливных материалов для перспективных РБН с плотным топливом

Для снижения риска применительно к БРЕСТ необходимо отсрочить как можно дальше стадию МВТО.

Реализуется двумя путями:

- a) Регулированием структуры оболочки для согласования её набухания с набуханием нитридного топлива
- b) Увеличением зазора топливо/оболочка, заполненного жидким металлическим подслоем для снижения температуры и набухания топлива .

## **Оценка параметров «идеального» твэла с ЖМП и нитридным топливом (на макс. выгорание 17 ат. %)**

- Оболочка – Сталь 555 толщиной 0,4 мм
- R-зазор топливо/оболочка ~ 0,25 мм
- ЖМП – сплав СвиНатр
- Топливо – плотность 95 % ТП с примесью кислорода не более 1000 ppm

# Достигнутая энерговыработка на U-Pu топливе

