

М.Ю. Колесник^{1,2}, Т.Н. Алиев^{1,2}, В.В. Лиханский^{1,2}, Б.А. Гурович¹, А.С. Фролов¹, О.О. Забусов¹, Е.А. Кулешова¹, Д.В. Сафонов¹

¹НИЦ «Курчатowskiй Институт», ²ФИАН им. П.Н. Лебедева

Аннотация: По заказу АО «ТВЭЛ» в НИЦ «Курчатowskiй Институт» была реализована Фаза I экспериментальных и расчетно-теоретических исследований переориентации гидридов в оболочках ТВЭЛов, изготовленных на основе сплава Э110. Испытания проводились при различных термомеханических сценариях, характерные для эксплуатации, транспортировки и сухого хранения отработавшего ядерного топлива. Расчетно-теоретическое сопровождение было выполнено с использованием расчетного модуля, который позволяет оценивать долю радиально-ориентированных гидридов. Результатом анализа экспериментальных данных является верификация параметров модели для прогнозирования степени переориентации гидридов в оболочках ТВЭЛов, изготовленных из сплава Э110. Программа исследований будет продолжена на Фазе II.

ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ

Положение 1

Водород может находиться в одном из трех состояний: твердый раствор (C_s), радиальные (C_r), или тангенциальные (C_t) гидриды; $C_s + C_r + C_t = const$.

Положение 2

Доля радиальных гидридов определяется соотношением частот нуклеации

$$\frac{dC_r}{dC_t} \approx \frac{s_r}{s_t} = f_0^{-1} \exp\left(-\frac{\Delta G^*}{kT}\right)$$

s_r, s_t – частоты нуклеации r - и t -гидридов;
 ΔG^* – разница изменений свободной энергии r - и t -зародышей;

$$F_r^{**} = \frac{dC_r}{dC_r + dC_t}$$

F_r^{**} – доля радиальных гидридов;

$$\Delta G^* \approx \sigma \cdot \Delta \Omega$$

σ – внешние напряжения;

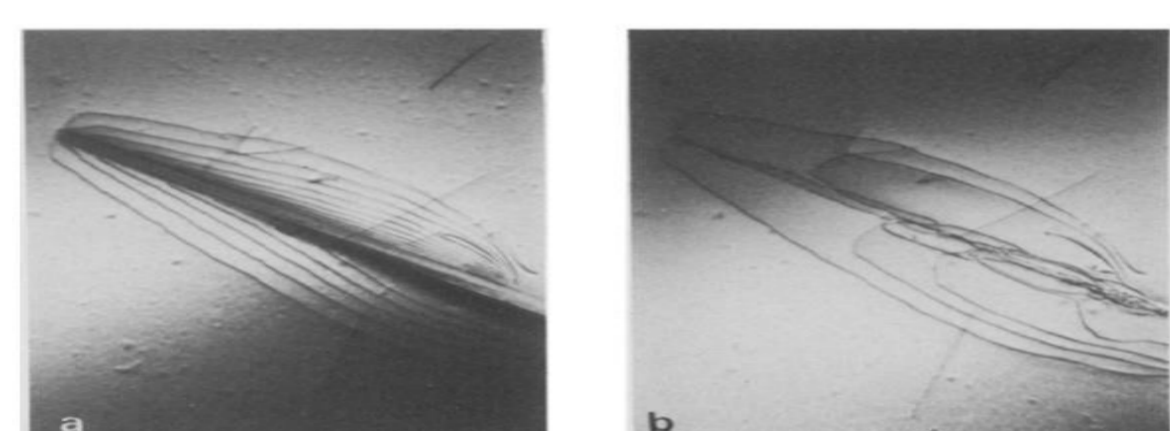
$\Delta \Omega$ – разница дилатаций r - и t -гидридов

Положение 3

Учитывается фактор текстуры образца. Текстура оболочек обеспечивает минимальную долю радиальных гидридов f_{tex} , а другая часть определяется условиями переориентации: $F_r^* = F_r^{**}(1 - f_{tex}) + f_{tex}$

Положение 4

Учитывается фактор памяти гидридов. Фактор f_{me} пропорционален общей площади испущенных дислокационных петель, который увеличивается за счет испускания новых петель при росте гидрида и уменьшается при отжиге за счет диффузии вакансий:



$$F_r = F_r^{**}(1 - f_{tex} - f_{me}) + f_{tex} + f_{me}$$

$$f_{me} = k_{me} \frac{1 - S_r^{hyd}/S_r}{(1 - S_r^{hyd}/S_r) + (1 - S_t^{hyd}/S_t)}$$

Положение 5

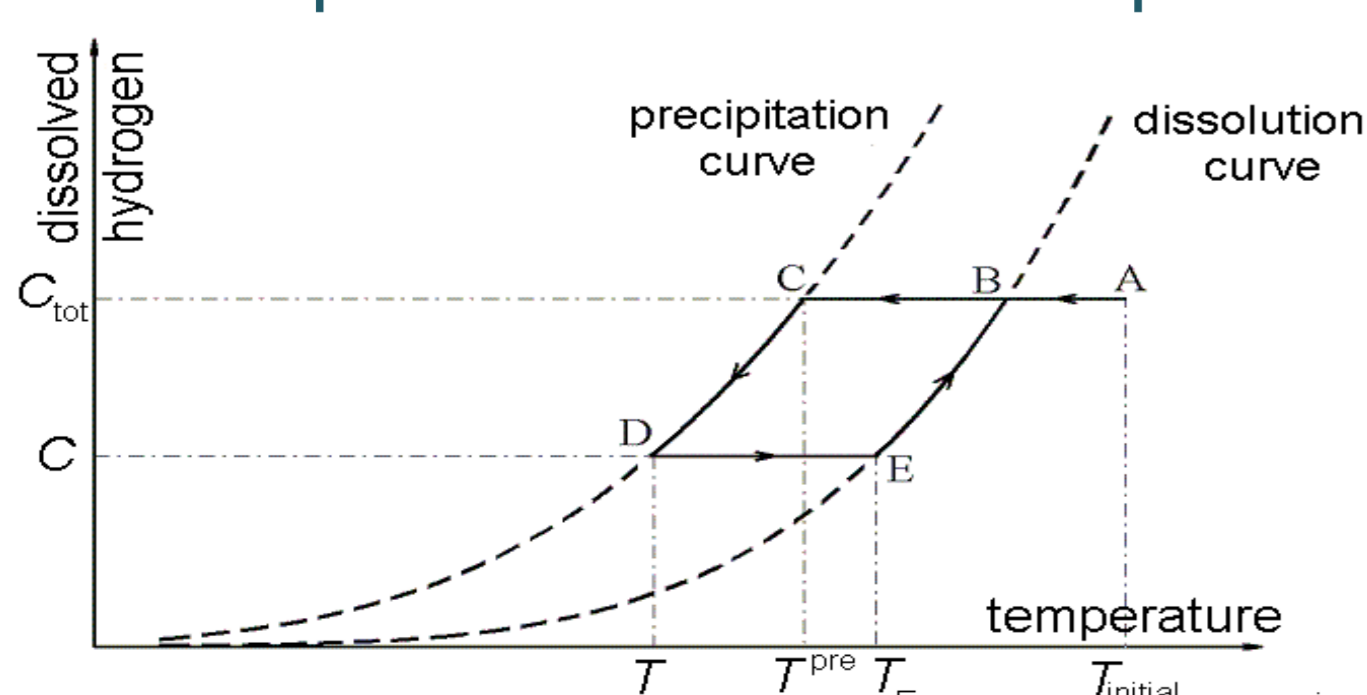
Модель является кинетической. Сток водорода описывается на основе аналитического решения для симметрически-симметричной задачи.

$$J^{+/-} = 2\pi D_H w_{stack} (C_s - C_0^{TSSP/TSSD}) \cdot C_{stack}$$

$$\begin{cases} \frac{dC_r}{dt} = F_r \cdot J^+, \\ \frac{dC_t}{dt} = (1 - F_r) \cdot J^+, & C_s < C^{TSSP} \\ \frac{dC_s}{dt} = -\frac{dC_r}{dt} - \frac{dC_t}{dt} \end{cases} \quad \begin{cases} \frac{dC_r}{dt} = J^-, \\ \frac{dC_t}{dt} = J^-, & C_s < C^{TSSD} \\ \frac{dC_s}{dt} = -\frac{dC_r}{dt} - \frac{dC_t}{dt} \end{cases}$$

Положение 6

Растворимость имеет гистерезис

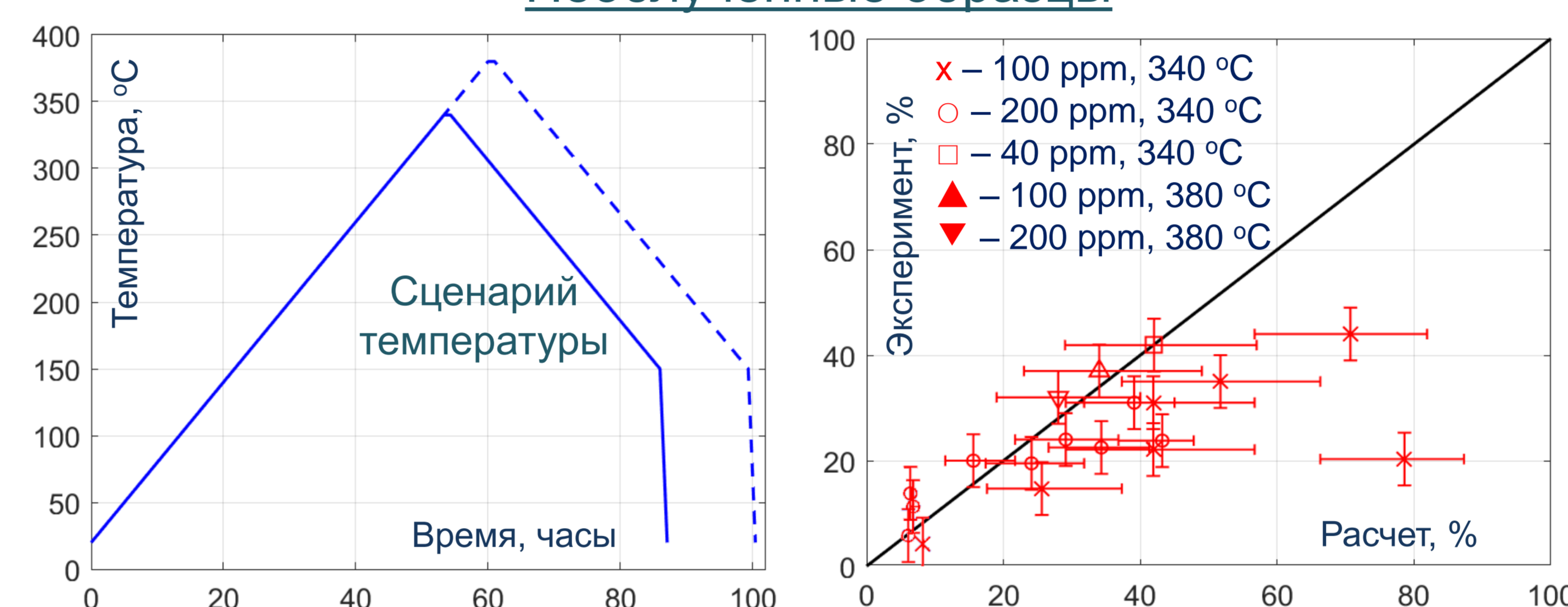


Гидриды растворяются ниже TSSD и выпадают выше TSSP. Ни растворение, ни преципитация не происходят между TSSD и TSSP.

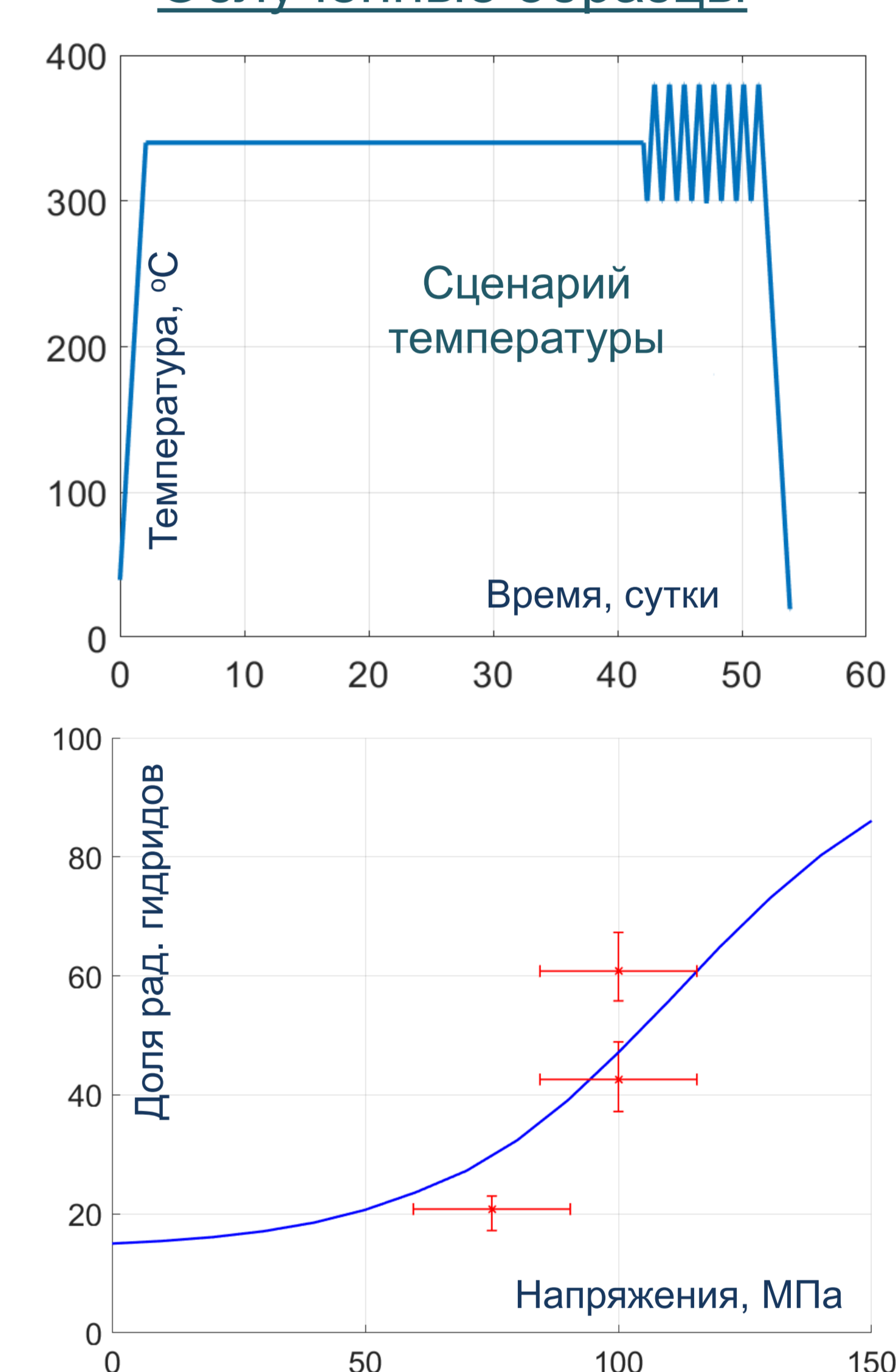
СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАМИ

финальный этап Фазы I

Необлученные образцы



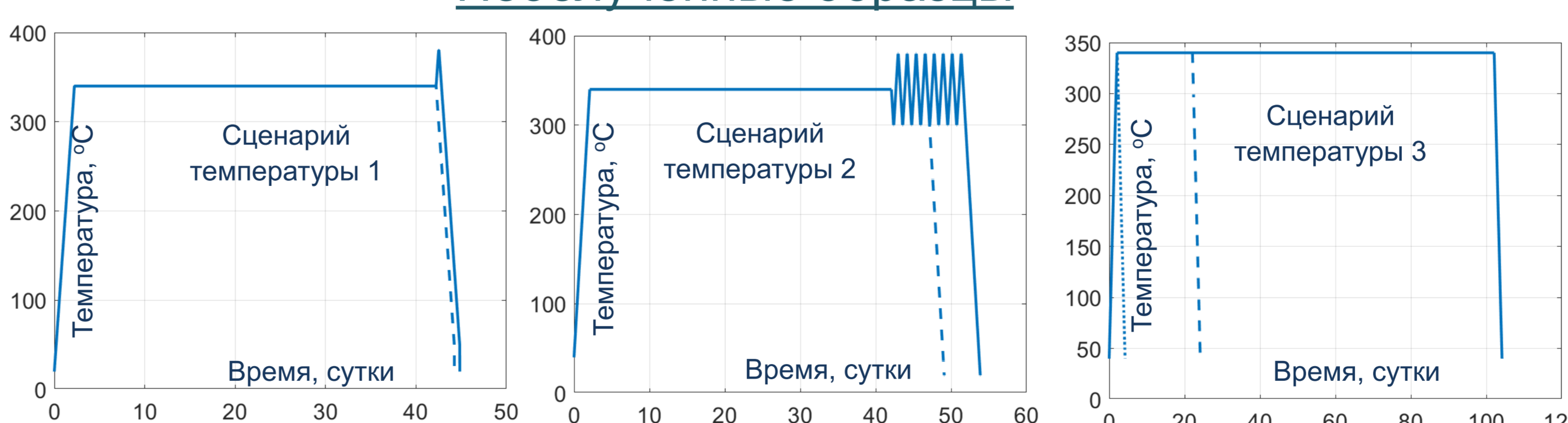
Облученные образцы



ФАЗА II ИСПЫТАНИЙ

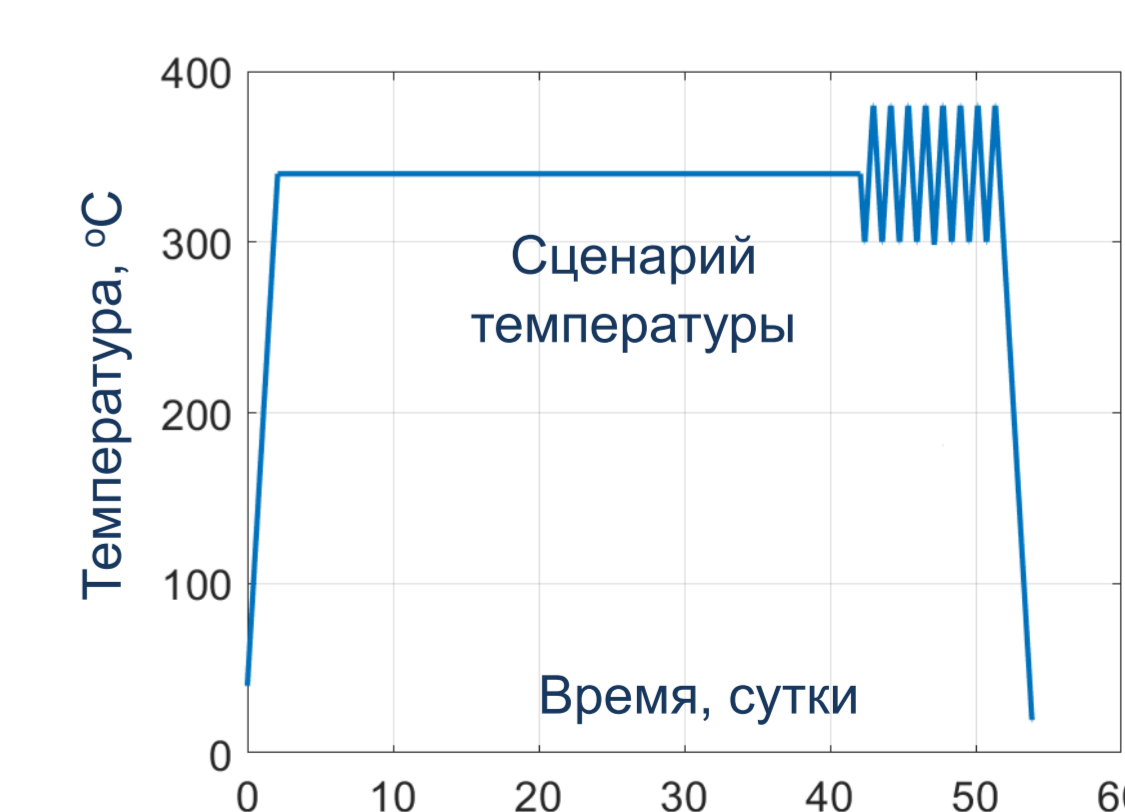
начало реализации – 2021 год

Необлученные образцы



- окружные напряжения от 120 до 180 МПа (при 340 °С)
- содержание водорода 50 – 200 ppm
- вариация скорости охлаждения

Облученные образцы



- окружные напряжения от 50 до 100 МПа (при 340 °С)
- до 14 образцов