ВНИИНМ
РОСАТОМ

Критерий разгерметизации оболочек твэлов реакторов типа ВВЭР в условиях LOCA

П.В. Федотов, В.И. Кузнецов, В.В. Новиков, А.В. Салатов
АО «ВНИИНМ» г. Москва, PVFedotov@bochvar.ru

МАЯТ-2021, 25 ноября 2021 г.

Докладчик: П.В. Федотов

Цели и задачи

ВНИИНМ
РОСАТОМ

Целью работы, представленной в настоящем докладе, является модернизация критериев разгерметизации оболочек твэлов реакторов типа ВВЭР, используемых при проектных обоснованиях безопасности топлива Российского производства в условиях LOCA.

LOCA (Loose Of Coolant Accident) - авария с потерей теплоносителя, например, вызванная разрывом главного циркуляционного трубопровода на входе в реактор. Характеризуется повышением температуры оболочки (до 1200°С) при механическом нагружении оболочки внутренним давлением (до 10 МПа).

Корректный прогноз разгерметизации оболочки влияет на точность оценок критериальных параметров , характеризующих безопасность твэла, таких как максимальная температура топлива и оболочки, степень окисления оболочки, доля прореагировавшего с паром циркония.

Оценка критериальных параметров проводится расчетным путем с использованием компьютерных кодов. В Российской Федерации для этих целей используется, разработанный в АО «ВНИИНМ» код РАПТА-5.2.

Силовой критерий разгерметизации

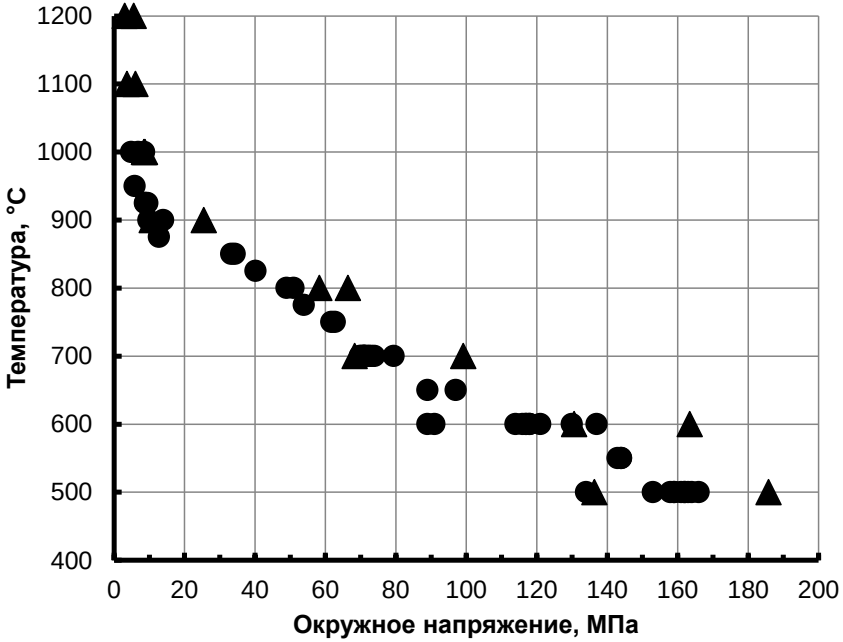
Силовой критерий разгерметизации представляет собой зависимость вида [1]:

$$T_R = a - \frac{b \cdot \sigma_\theta}{1+\frac{h}{c}} - \frac{d \cdot \sigma_\theta}{\left(1+\frac{h}{c}\right)+e \cdot \sigma_\theta}, \qquad (1)$$

где a, b, c, d, e – константы; T_R - температура при разгерметизации, К; σ_θ - тангенциальное напряжение в оболочке, МПа; h - скорость нагрева, К/с.

1. D.A.Powers, R.O. Meyer. Cladding swelling and rupture models for LOCA analyses. Technical report NUREG-0630. US NRC, Washingron D.C. 1980

Силовой критерий разгерметизации. Экспериментальные данные

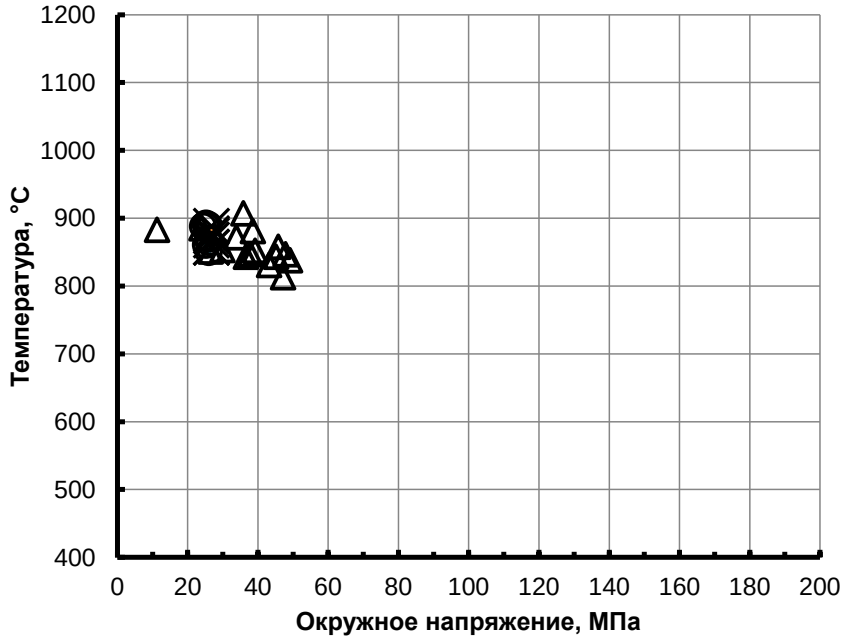


Использованы данные о температурной зависимости предела прочности при скорости деформации ~ 0,01 1/с

● Э110опт. кольца при 0,02 1/с (Скорость нагрева 0 °С/с)

▲ Э110 цилиндры при 0,005 1/с (Скорость нагрева 0 °С/с)

Силовой критерий разгерметизации. Экспериментальные данные

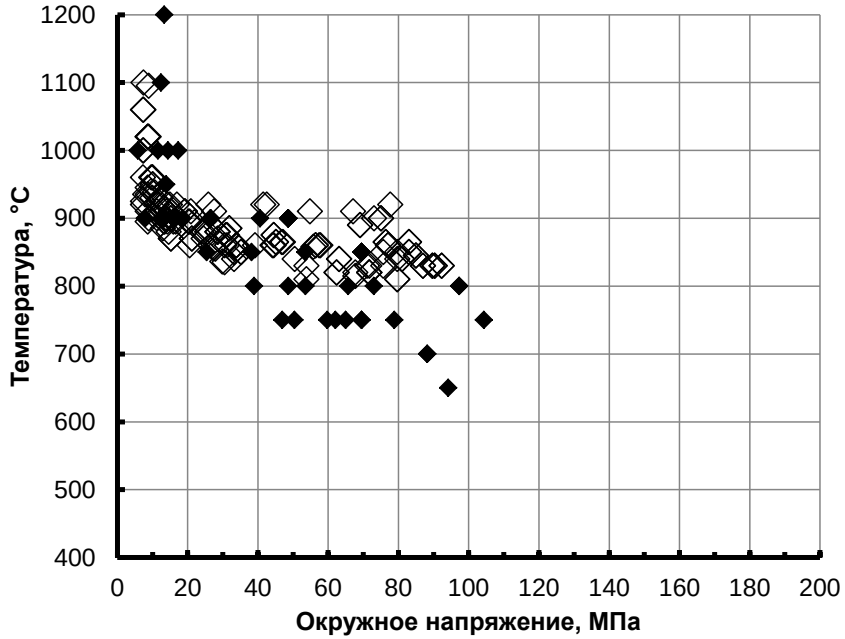


Использованы данные о результатах испытаний экспериментальных ТВС в условиях LOCA на стенде ПАРАМЕТР (АО «НИИ НПО «ЛУЧ»)

○ , ✕ Э110опт. Стенд ПАРАМЕТР (Скорость нагрева ~4 °С/с)

△ Э110 Стенд ПАРАМЕТР (Скорость нагрева ~2 °С/с)

Силовой критерий разгерметизации. Экспериментальные данные



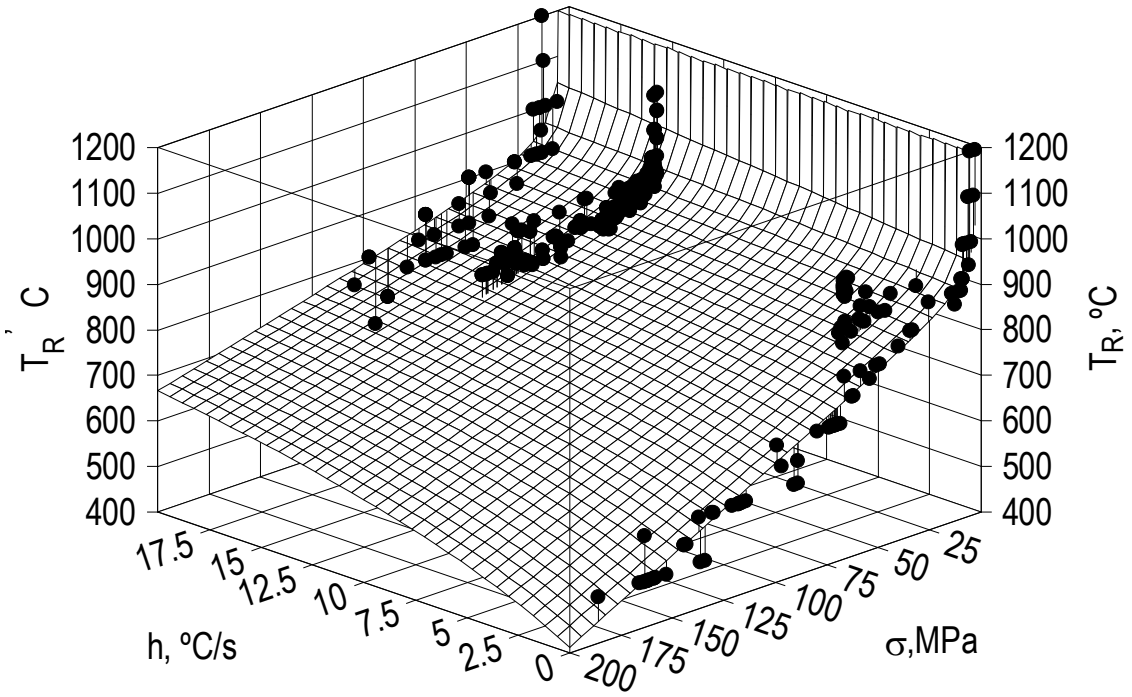
Использованы данные о результатах испытаний имитаторов твэлов и ампульных образцов (АО «ВНИИНМ»)

◇ Э110 имитаторы (Скорость нагрева 10-20 °С/с)

◆ Э110 ампулы (Скорость нагрева ~ 20 °С/с)

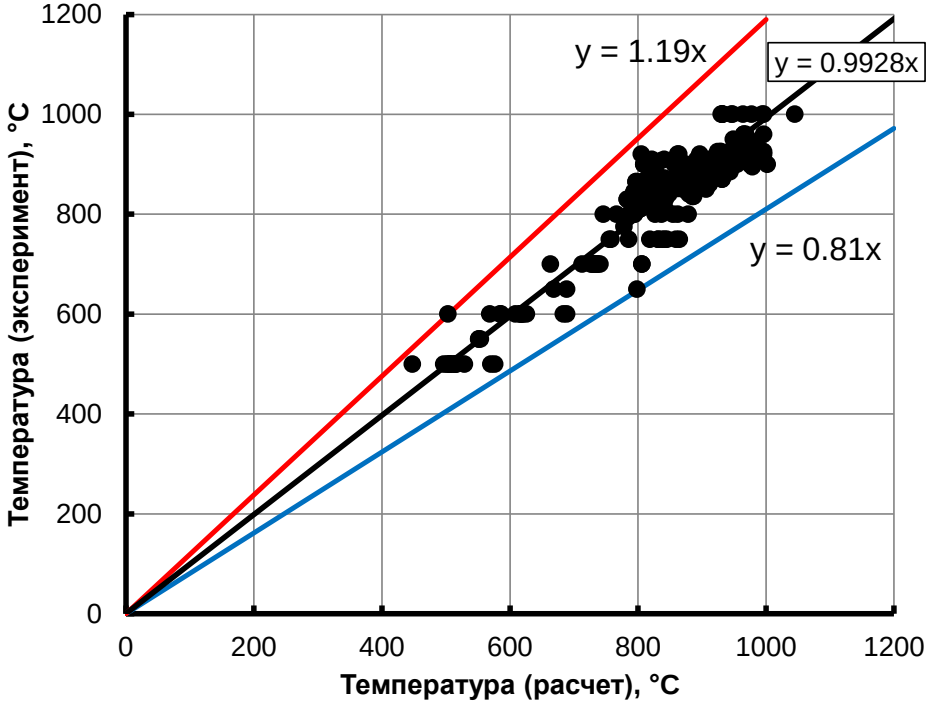
Силовой критерий разгерметизации

$$T_R = 7052.5594 - \frac{2.4602973 \cdot \sigma}{1 + \frac{h}{19.195964}} - \frac{87364.185 \cdot \sigma}{1 + \frac{h}{19.195964} + 14.205737 \cdot \sigma}$$



Коэффициенты уравнения (1) определены методом наименьших квадратов

Силовой критерий разгерметизации. Погрешность.



Погрешность расчета (относительное отклонение экспериментальной точки от расчетного значения) по уравнению (1) не превышает 19 %.

Деформационный критерий разгерметизации.

ВНИИНМ РОСАТОМ

Деформационный критерий разгерметизации базируется на принципе линейного суммирования повреждений при деформировании в условиях нестационарного температурно-силового нагружения [2]:

$$\sum_{i=1}^{n} \Delta\varepsilon_{\theta i} / \varepsilon_{\theta rupi} = 1, \qquad (2)$$

где $\Delta\varepsilon_{\theta i}$ – приращение окружной логарифмической деформации на некотором i-том этапе расчета; $\varepsilon_{\theta rupi}$ – окружная логарифмическая деформация при разрушении в квазистационарных условиях нагружения, соответствующих некоторому i-том этапу расчета.

2. Ю.И. Лихачев. В.Я. Пупко, Прочность тепловыделяющих элементов ядерных реакторов, Москва, Атомиздат, 1975 г., стр 61-65.

Деформационный критерий разгерметизации.

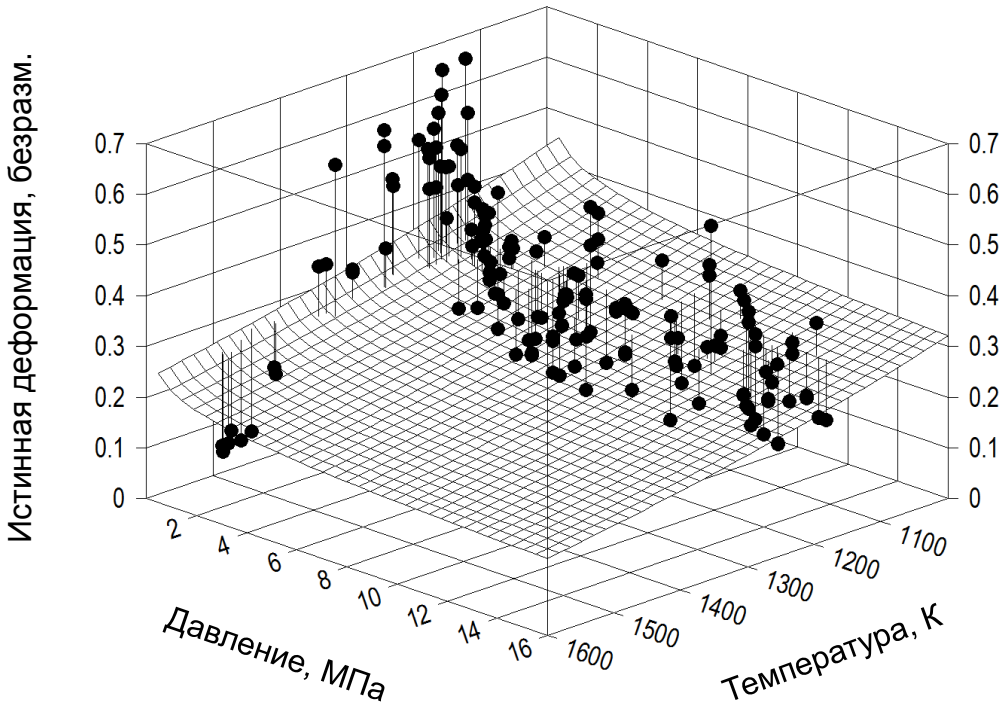
При этом окружная логарифмическая деформация при разрушении в квазистационарных условиях может быть описана уравнением [3]:

$$\varepsilon_{\theta rup}(P,T)=a\cdot\exp(b\cdot T)\cdot P^{c+d\cdot T}, \qquad (3)$$

где a, b, c, d, e – константы; P – давление при разгерметизации, МПа; T – температура при разгерметизации, К.

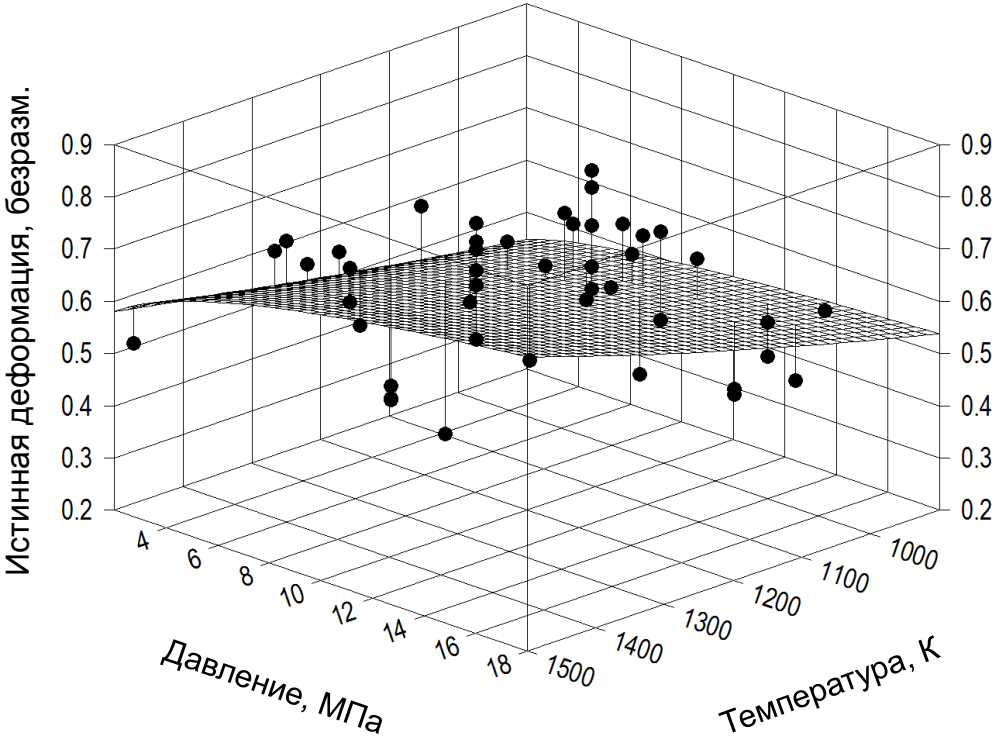
3. P.V. Fedotov, A.A. Goncharov, A.V. Kumachev, et al. Estimation of Water-Water Energy Reactor Fuel Rod Failure in Design Basis Accidents. Proceedings of the Water Reactor Fuel Performance Meeting. October 2-6. Kyoto. 2005. p. 835-837.

Деформационный критерий разгерметизации. Экспериментальные данные.



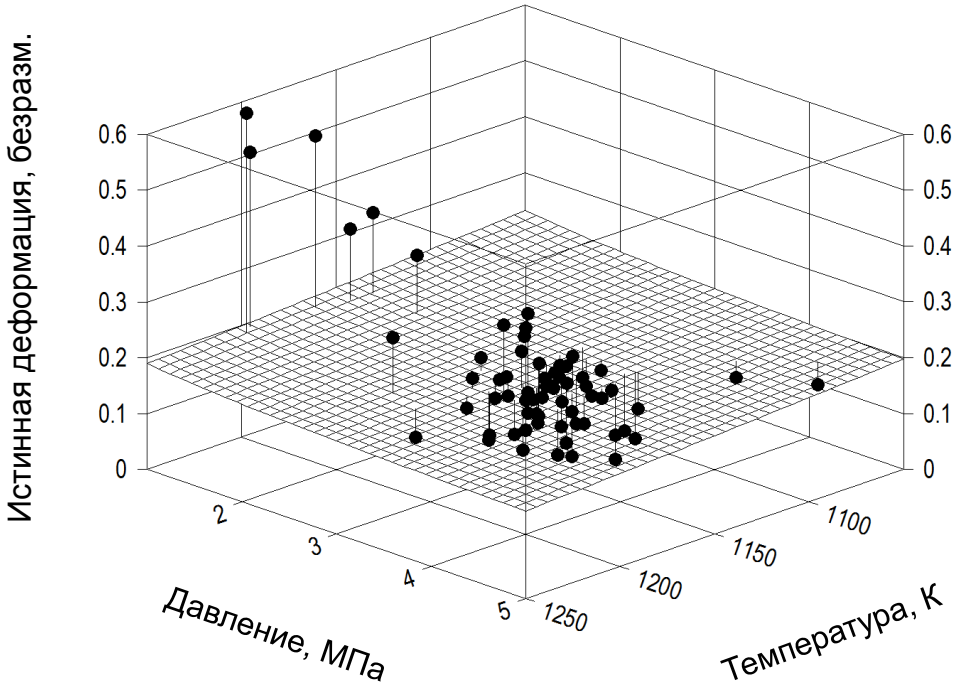
Использованы данные о результатах испытаний имитаторов твэлов (АО «ВНИИНМ»).

Деформационный критерий разгерметизации. Экспериментальные данные.



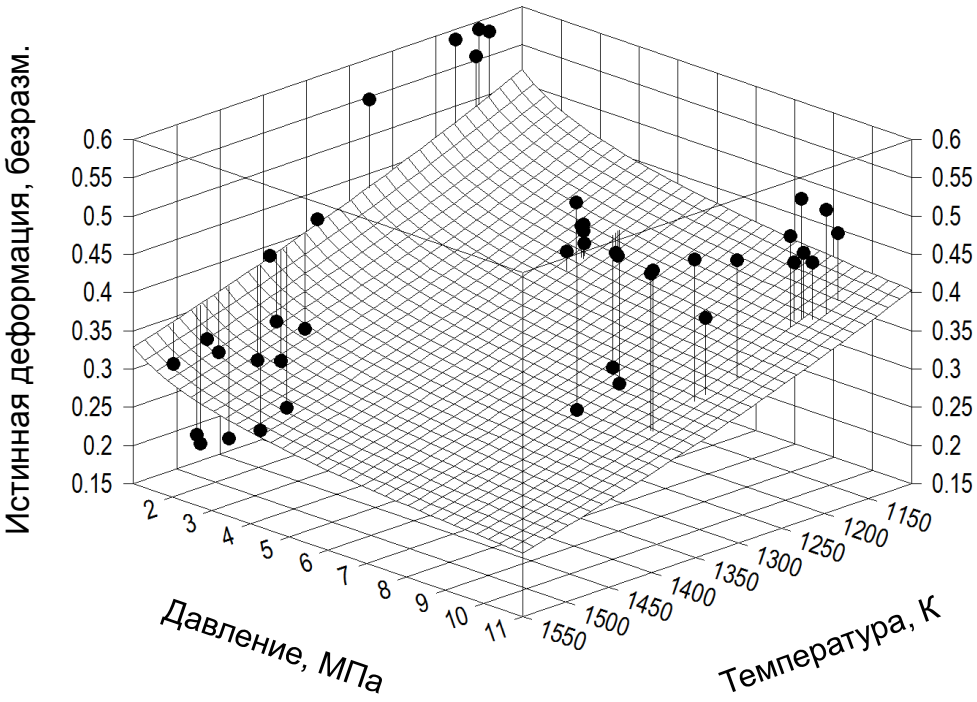
Использованы данные о результатах испытаний ампульных образцов (АО «ВНИИНМ»).

Деформационный критерий разгерметизации. Экспериментальные данные.



Использованы данные о результатах испытаний экспериментальных ТВС в условиях LOCA на стенде ПАРАМЕТР (АО «НИИ НПО«ЛУЧ»)

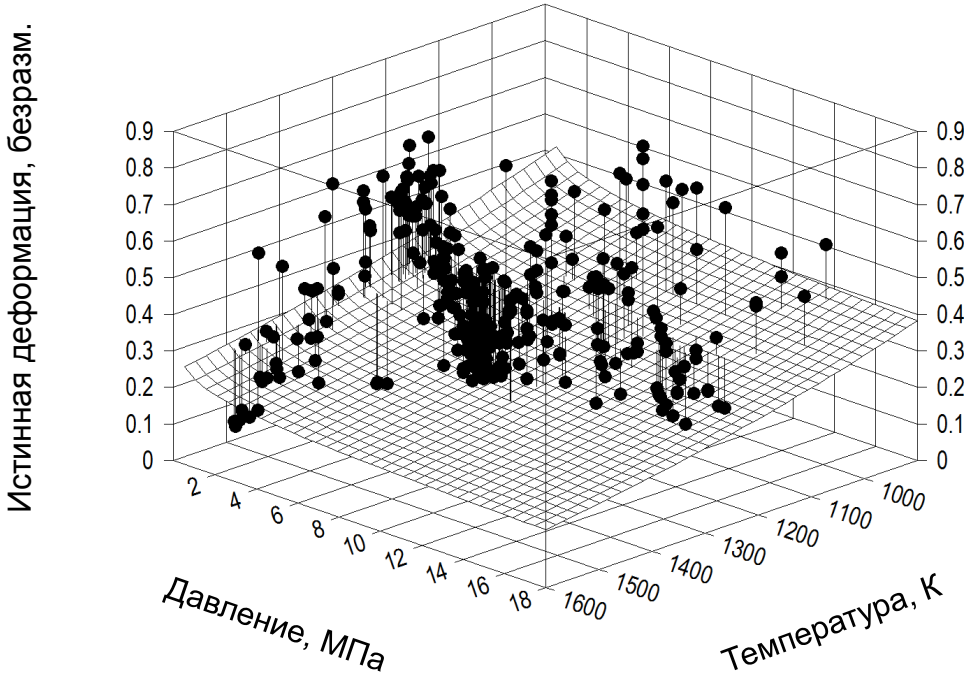
Деформационный критерий разгерметизации. Экспериментальные данные.



Использованы данные о результатах «burst» тестов (АО «НИИ НПО «ЛУЧ»).

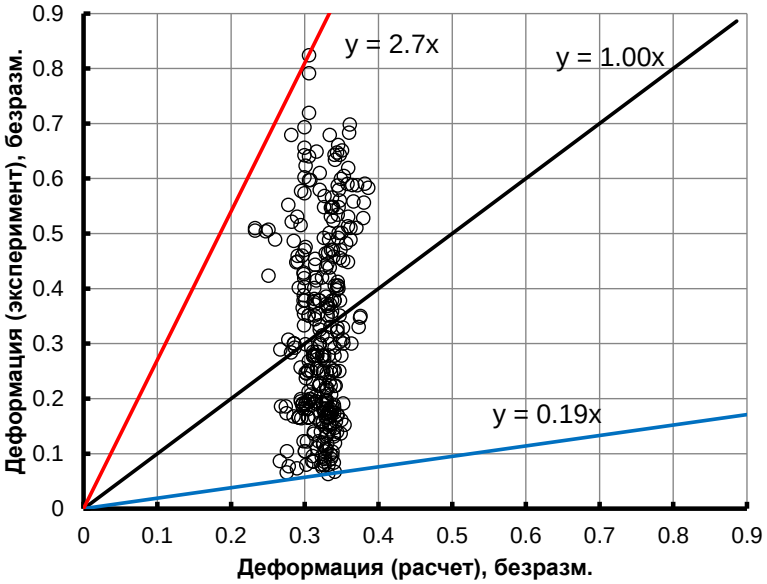
Деформационный критерий разгерметизации.

$$\varepsilon_{\theta rup}(P,T)=1{,}2221387\cdot\exp(-0{,}00101046\cdot T)\cdot P^{-0{,}01073467-8{,}5199\cdot T}$$



Коэффициенты уравнения (3) определены методом наименьших квадратов

Деформационный критерий разгерметизации. Погрешность.

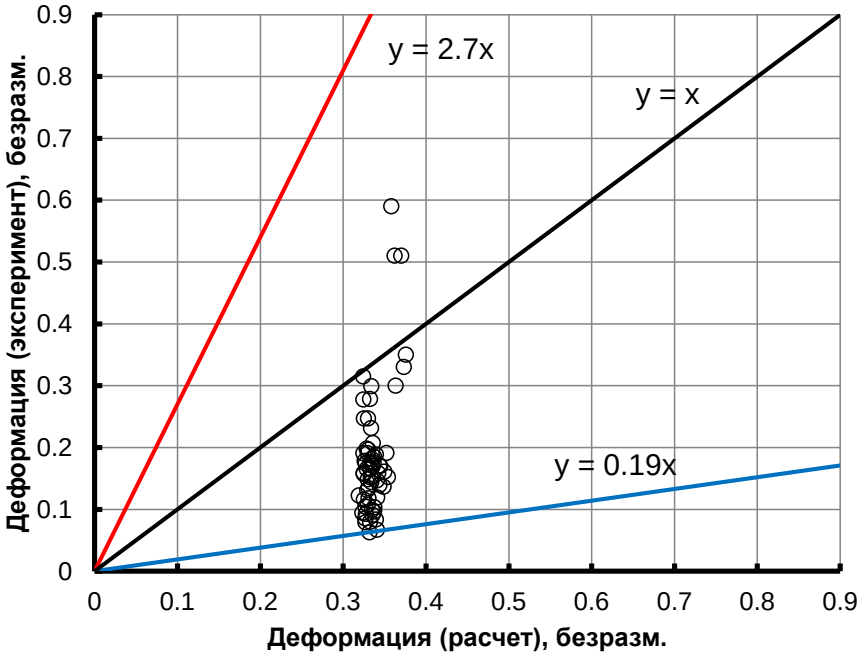


Погрешность расчета (относительное отклонение экспериментальной точки от расчетного значения) по уравнению (2) составляет $^{+170\%}/_{-81\%}$.

Полученный разброс экспериментальных данных не противоречит имеющимся представлениям об экспериментальных погрешностях определения деформаций при разгерметизации оболочек [1].

1. D.A.Powers, R.O. Meyer. Cladding swelling and rupture models for LOCA analyses. Technical report NUREG-0630. US NRC, Washingron D.C. 1980

Деформационный критерий разгерметизации. Погрешность.



Уравнение (3) адекватно оценивает результатах испытаний ТВС на стенде ПАРАМЕТР.

Заключение

ВНИИНМ
РОСАТОМ

В настоящем докладе представлены результаты работ, выполненных с целью модернизации критериев разгерметизации оболочек твэлов реакторов типа ВВЭР, используемых при проектных обоснованиях безопасности топлива Российского производства в условиях LOCA.

- Предложены два критерия разгерметизации силовой (в виде зависимости температуры при разгерметизации от скорости нагрева и окружного напряжения в оболочке) и деформационный (в виде зависимости деформации при разгерметизации от температуры и давления).
- Определены коэффициенты, соответствующих зависимостей, а также оценены погрешности расчета с их использованием.

Спасибо
за внимание