



Международный научный семинар
«Перспективные направления развития
энергетической безопасности ядерных и
радиационных технологий» в преддверии
празднования 60-летия государственного
научного учреждения «ОИЭЯИ – СОСНЫ»



МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ РАСТВОРЕННЫХ СОЛЕЙ ВБЛИЗИ НАРУЖНЫХ СТЕНОК ТВЭЛОВ ВВЭР-1000 ПРИ КИПЕНИИ ТЕПЛНОСИТЕЛЯ

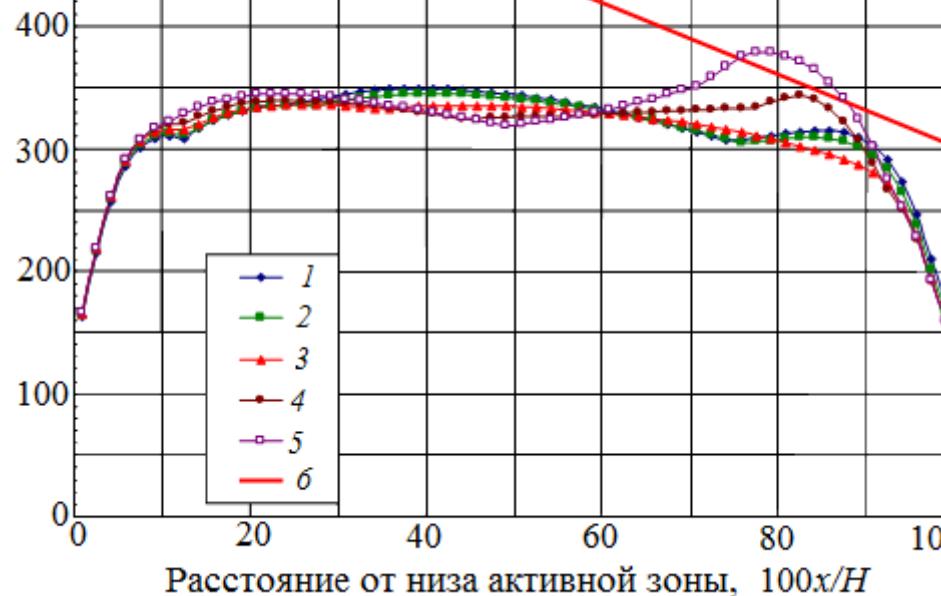
Сорокин В. В.

НУ «ОИЭЯИ – Сосны», Минск, Беларусь

Минск – 2025

Максимальная линейная нагрузка твэла,

Вт/см

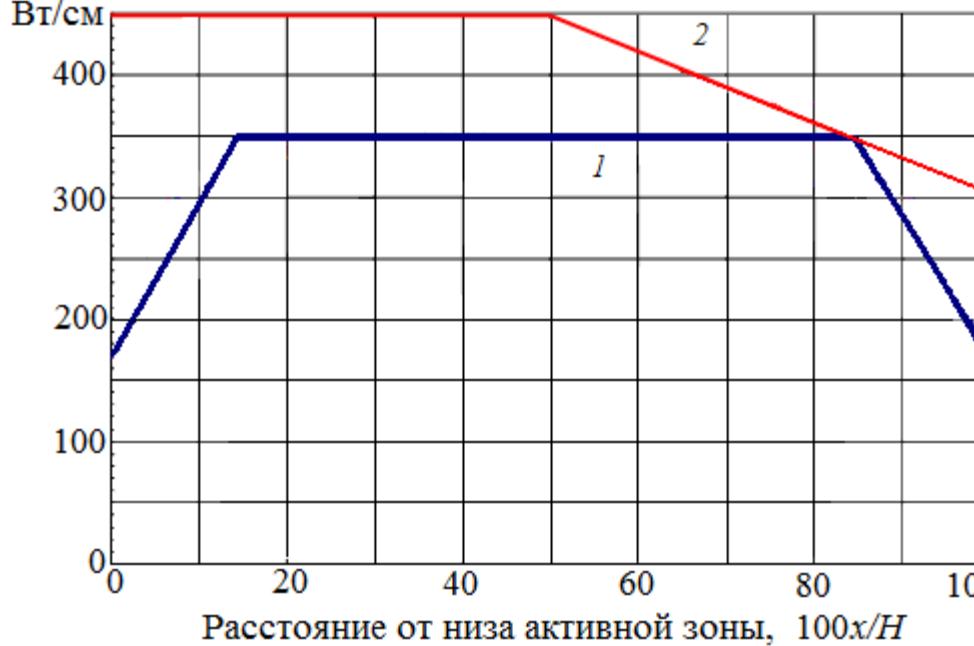


Расстояние от низа активной зоны, $100x/H$

Максимальная нагрузка твэла

Модельная линейная нагрузка твэла,

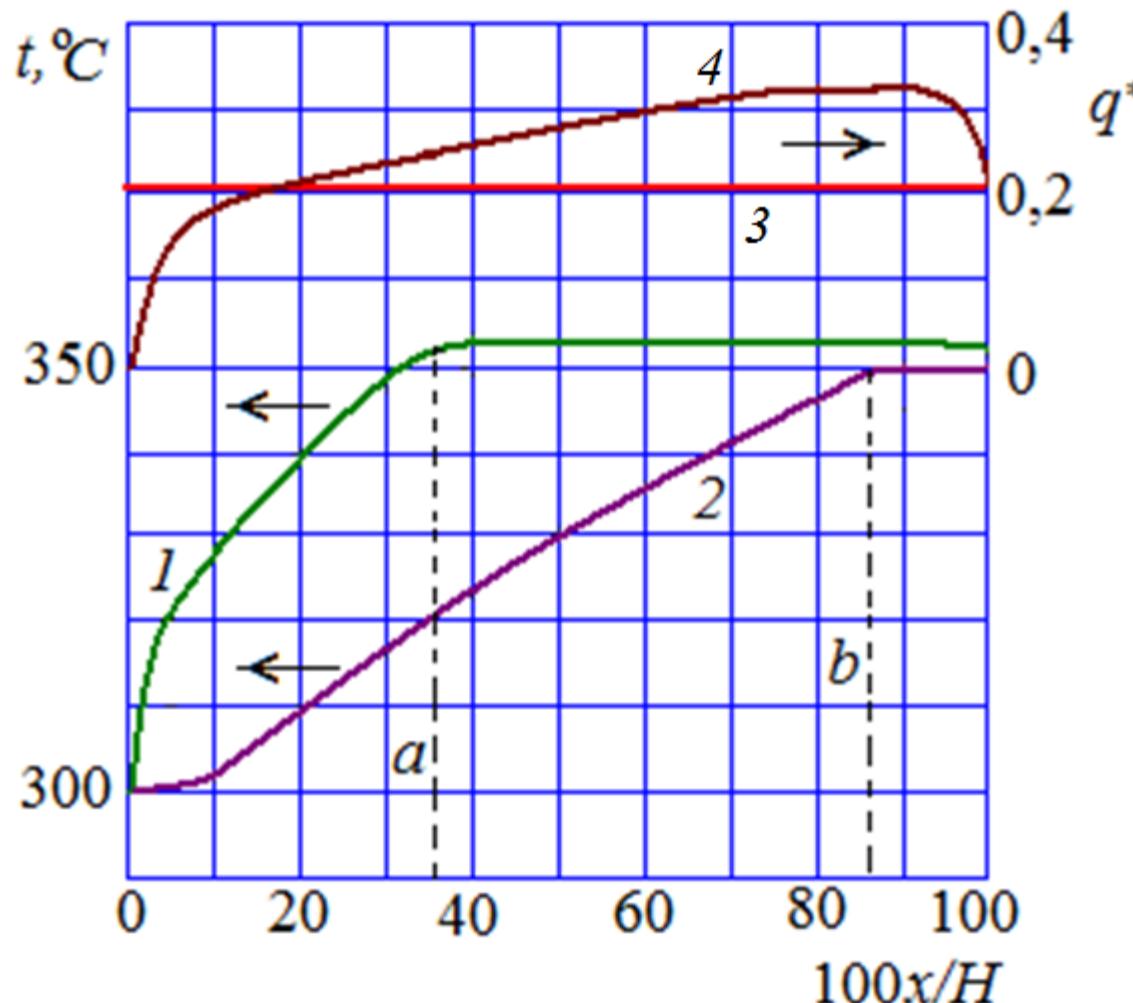
Вт/см



1 – представление нагрузки при моделировании,
2 – предельная допустимая мощность твэлов в базовом топливном цикле

ВВЭР-1000,
18-ти месячный цикл

Особенности кипения теплоносителя



Тип кипения
пузырьковый
При $q^* > 0,2$
режим слившихся
пузырьков
 $q^* = q/q_{\text{крит}}$

$$p = 16,5 \text{ МПа}$$

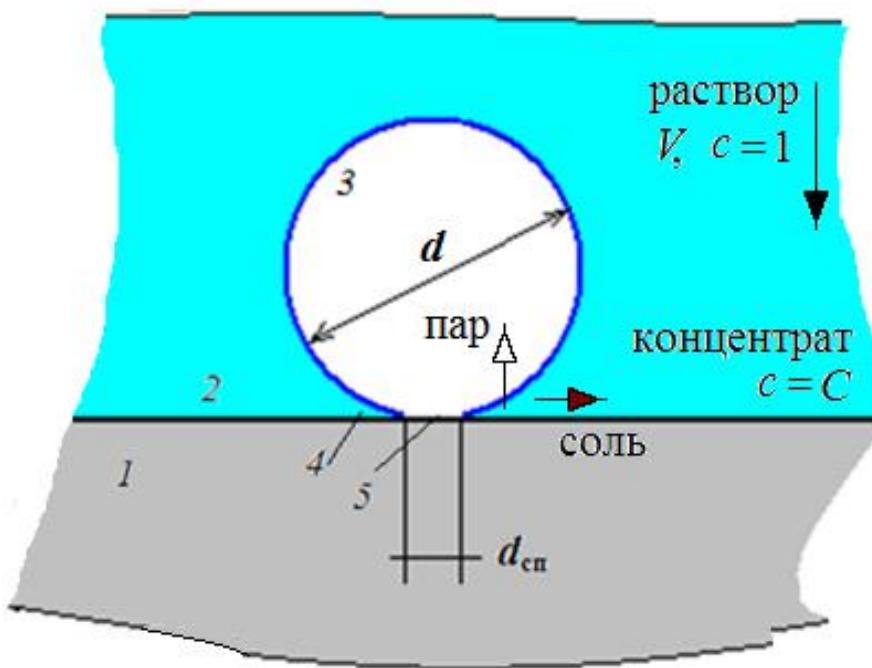
$$\rho_w = 4000 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$$

1 – температура наружной стенки твэла, 2 – температура теплоносителя, 3 – линия $q^* = 0,2$, 4 – тепловой поток приведенный

Режим отдельных пузырьков



A



B

A – фотография пузырьков;

B – схема пузырька для моделирования,

1 – стенка, 2 – жидкость,

3 – пузырек, 4 – испаряющийся мениск,

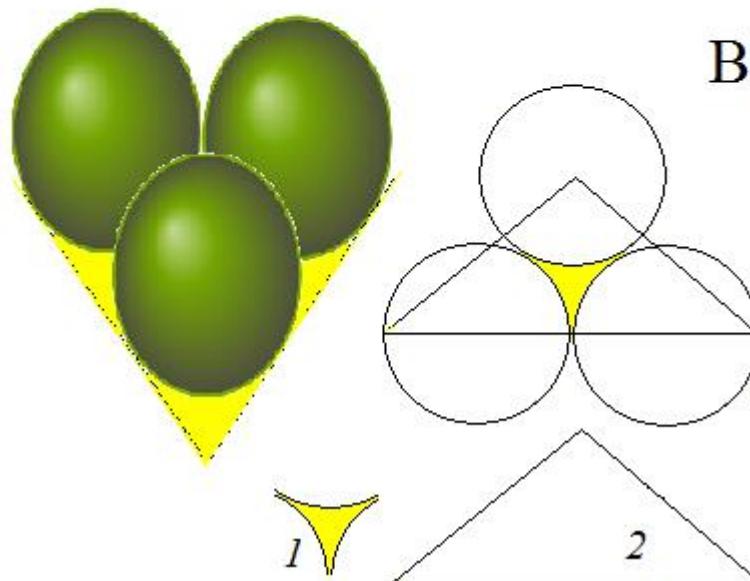
5 – шейка и сухое пятно

Скорость жидкости V обеспечивает расход пара от стенки в ядро потока теплоносителя в процессе кипения.



A

Режим слившихся пузырьков



$$\Pi = S_1/S_2 = 0,1$$

$$L = 0,3d$$

Π – доля поверхности стенки, не изолированная слившимися пузырями пара,
 S – площадь, L – масштаб длины

Баланс соли возле стенки

$$\Pi \alpha_D (1 - C) + V = k CV \quad (1)$$

Пример: коэффициент распределения недиссоциированной соли NaCl между паром и водой $k = 0,001$ при 16 МПа, $\alpha_D = 3 \cdot 10^{-3}$ м/с, $V = 1$ мм/с.

$$C = (3\Pi + 1)/3\Pi \quad (2)$$

$$\begin{array}{ll} \Pi = 1 & C = 1,3 \\ \Pi = 0,1 & C = 4,3 \end{array}$$

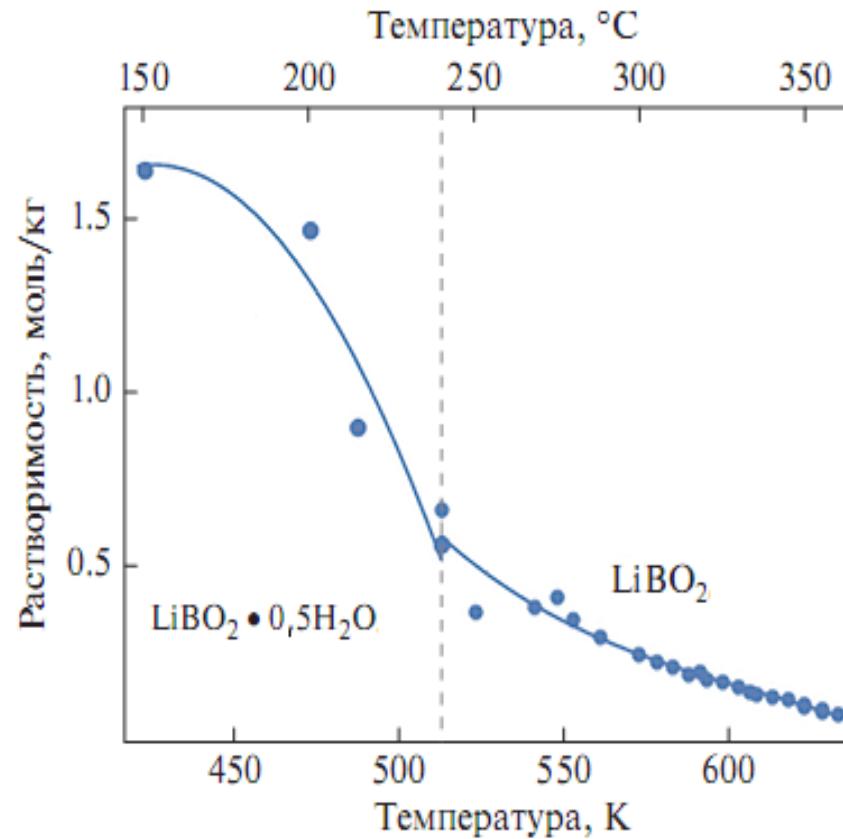
Баланс потоков соли между пузырями

$$D(C - 1)/L = V/\Pi \quad (3)$$

Пример: $\Pi = 0,1$ и $D = 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с.}$

$$C = 150$$

Растворимость бората лития в теплоносителе



По графику растворимость соли в условиях микрослоя составляет $2,7 \text{ г/дм}^3$. Максимальная концентрация иона лития в теплоносителе составляет $0,8 \text{ мг/кг}$ или $0,11 \text{ ммоль/кг}$ в пересчете на LiBO_2 . При $C = 150$ количество бората у стенки в 6 раз ниже концентрации насыщения.

ВЫВОДЫ

В активной зоне ВВЭР-1000 эксплуатирующегося с использованием 18-ти месячного топливного цикла на номинальной мощности на поверхности наиболее энергетически нагруженных твэлов происходит кипение теплоносителя в режиме пузырькового кипения со слившимися пузырьками на безразмерных высотах от 0,5 до 0,95. Расчетное массовое расходное паросодержание на выходе составляет менее 5%.

В типичной пространственной структуре из слившихся пузырей у стенки конвективный поток теплоносителя к стенке обеспечивает расход пара на образование пузырей, а диффузионный поток переносит соль от стенки в ядро потока. Баланс достигается, когда концентрация соли у стенки превосходит таковую в ядре потока в 150 раз.

В качестве примера установлено количество бората лития (LiBO_2) у стенки в 6 раз ниже концентрации насыщения.

Международный научный семинар
**«ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЯДЕРНЫХ
И РАДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»**

в преддверии празднования 60-летия
научного учреждения «ОИЭЯИ – Сосны»

20–22 мая 2025 года, г. Минск

*Лаборатория 21, научное учреждение
«ОИЭЯИ – Сосны» НАН Беларуси, Минск*