



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



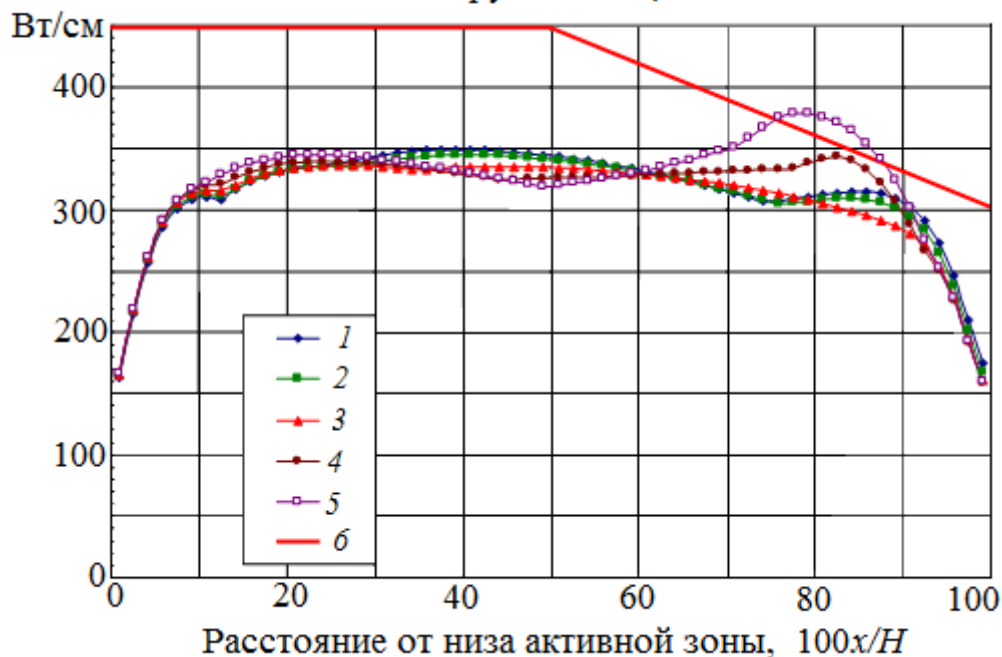
# МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ РАСТВОРЕННЫХ СОЛЕЙ ВБЛИЗИ НАРУЖНЫХ СТЕНОК ТВЭЛОВ ВВЭР-1000 ПРИ КИПЕНИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

**Сорокин В. В.**

НУ «ОИЭЯИ – Сосны», Минск, Беларусь

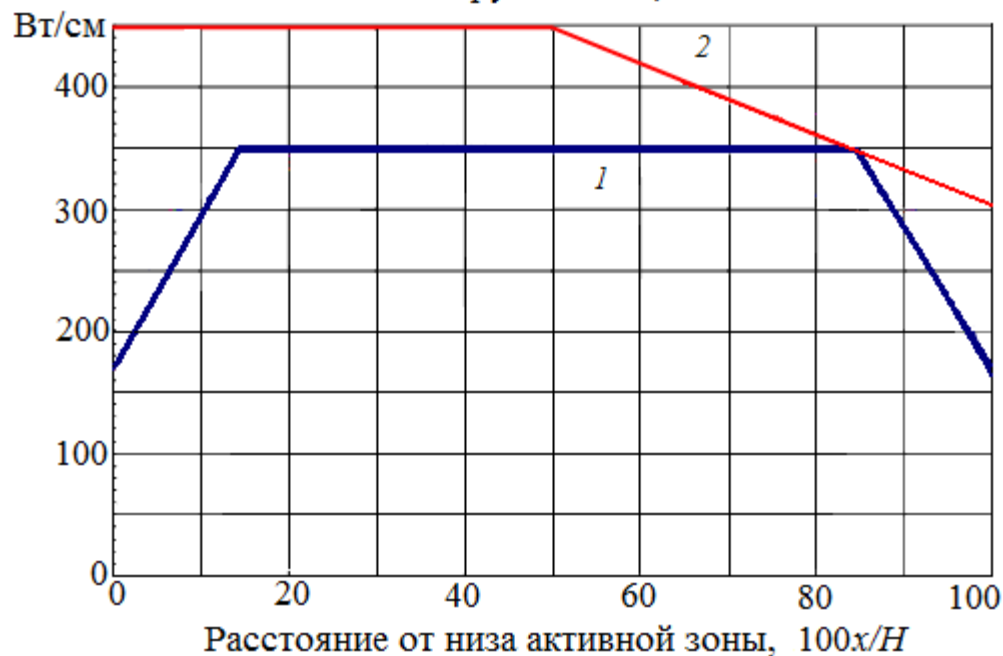
Минск – 2025

Максимальная линейная нагрузка твэла,



## Максимальная нагрузка твэла

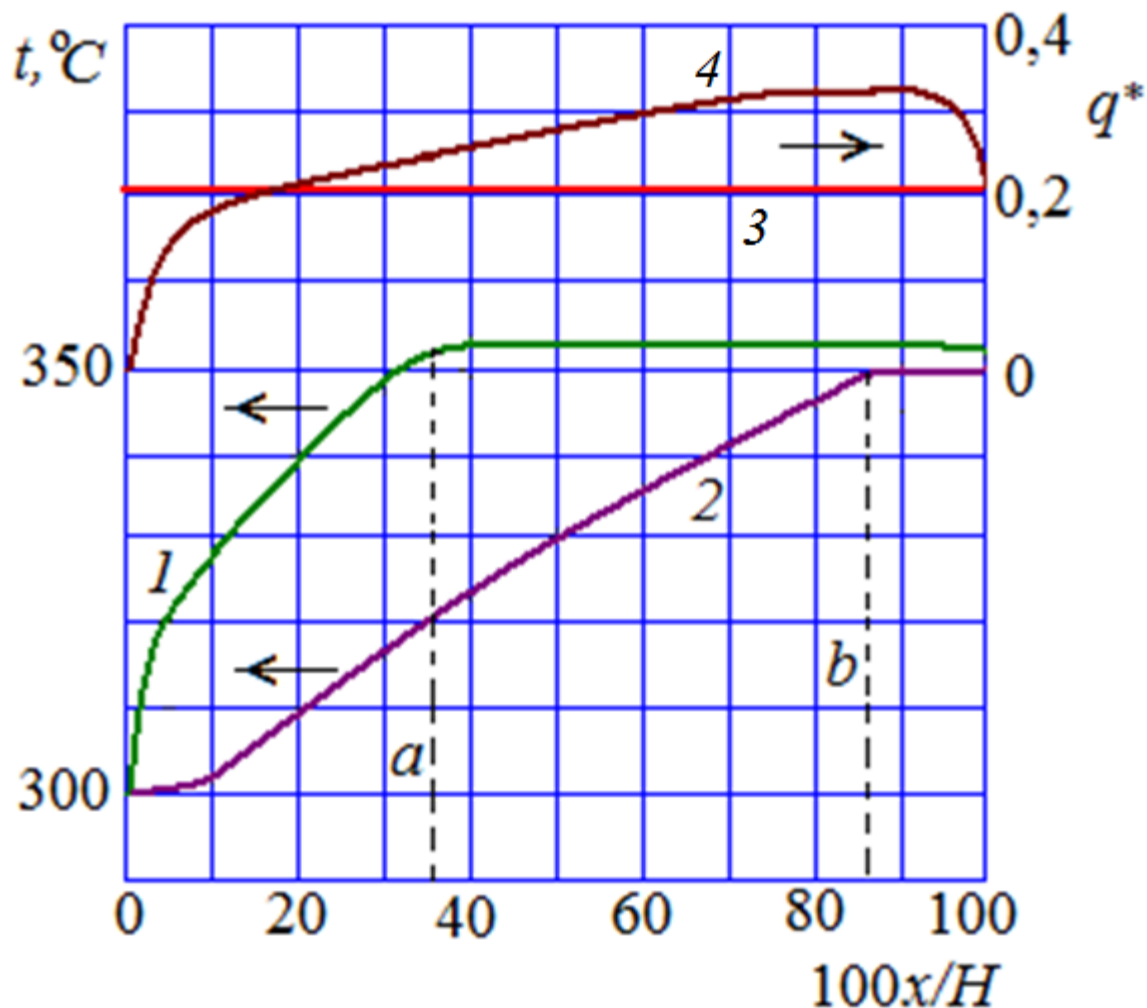
Модельная линейная нагрузка твэла,



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  
 $q^* = q/q_{\text{крит}}$

$p = 16,5 \text{ МПа}$   
 $\rho w = 4000 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$

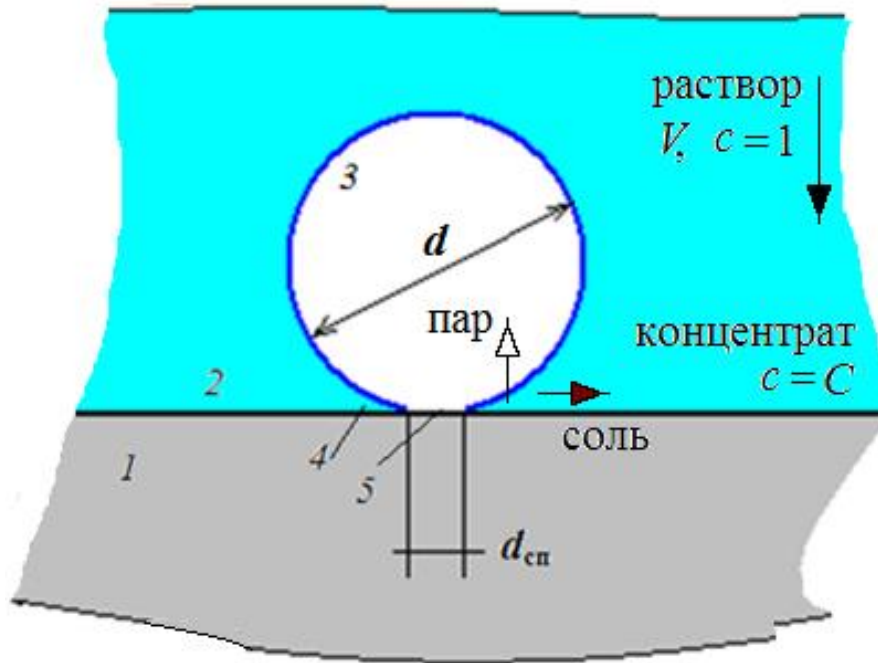
1 – температура наружной стенки твэла, 2 – температура теплоносителя, 3 – линия  $q^* = 0,2$ , 4 – тепловой поток приведенный

## Режим отдельных пузырьков



**A**

$d = 50$  мкм



**B**

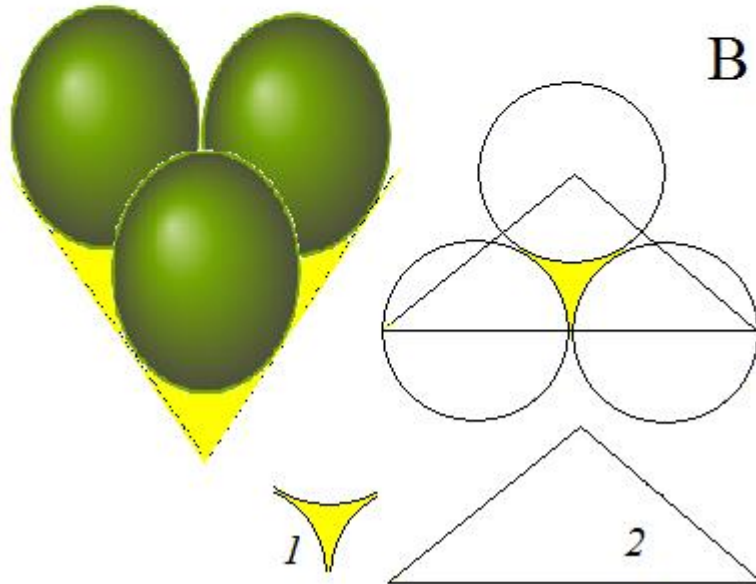
*A* – фотография пузырьков;  
*B* – схема пузырька для моделирования,  
 1 – стенка, 2 – жидкость,  
 3 – пузырек, 4 – испаряющийся мениск,  
 5 – шейка и сухое пятно

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



А

## Режим слившихся пузырьков



В

$$P = S_1/S_2 = 0,1$$

$$L = 0,3d$$

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

## Баланс соли возле стенки

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

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.

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

$$P = 1 \quad C = 1,3$$

$$P = 0,1 \quad C = 4,3$$

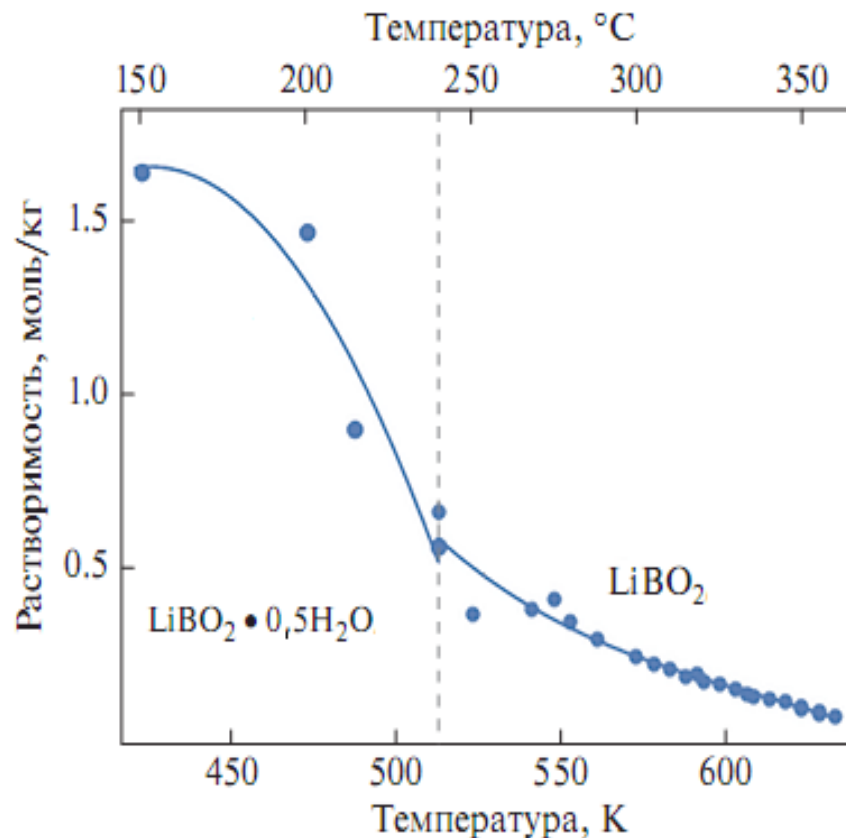
## Баланс потоков соли между пузырями

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

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 г/дм<sup>3</sup>. Максимальная концентрация иона лития в теплоносителе составляет 0,8 мг/кг или 0,11 ммоль/кг в пересчете на LiBO<sub>2</sub>. 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 ( $\text{LiBO}_2$ ) 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*