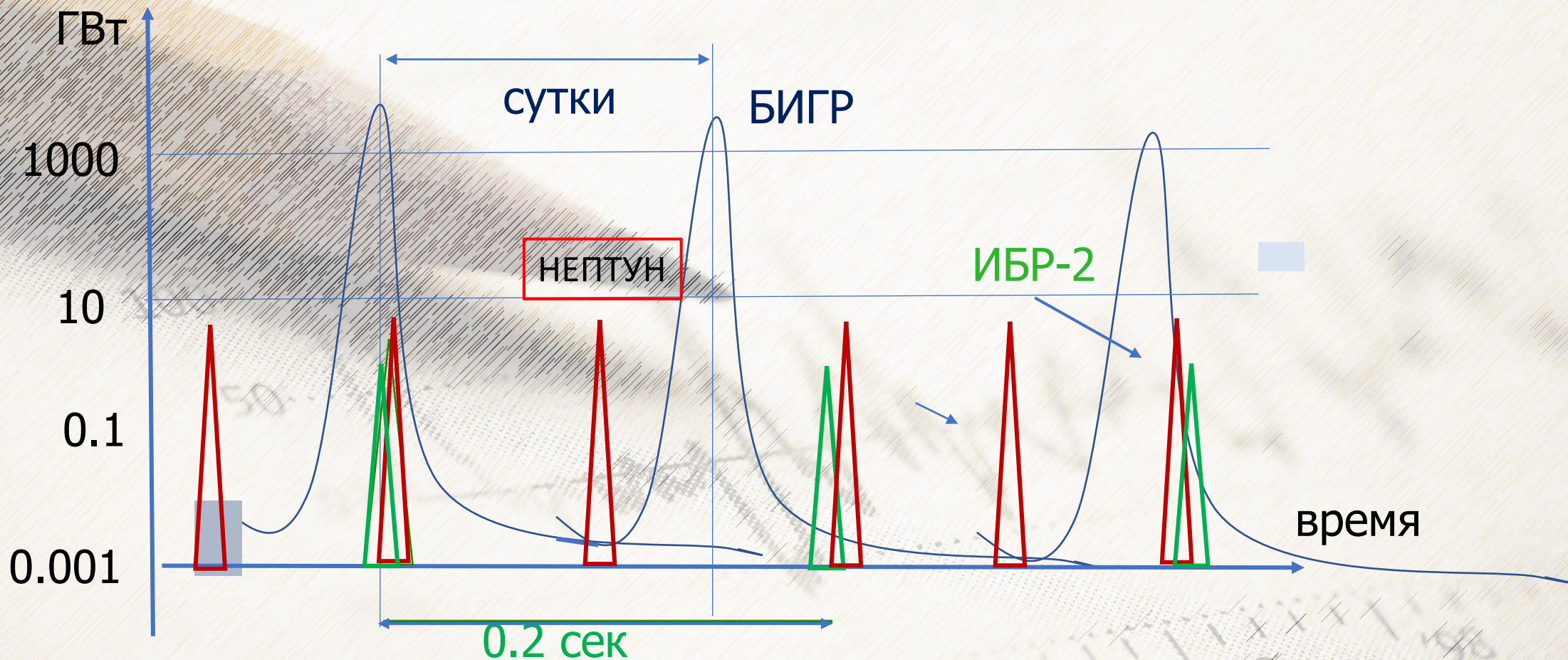


**Пульсирующий реактор НЕПТУН.  
Особенности динамики**

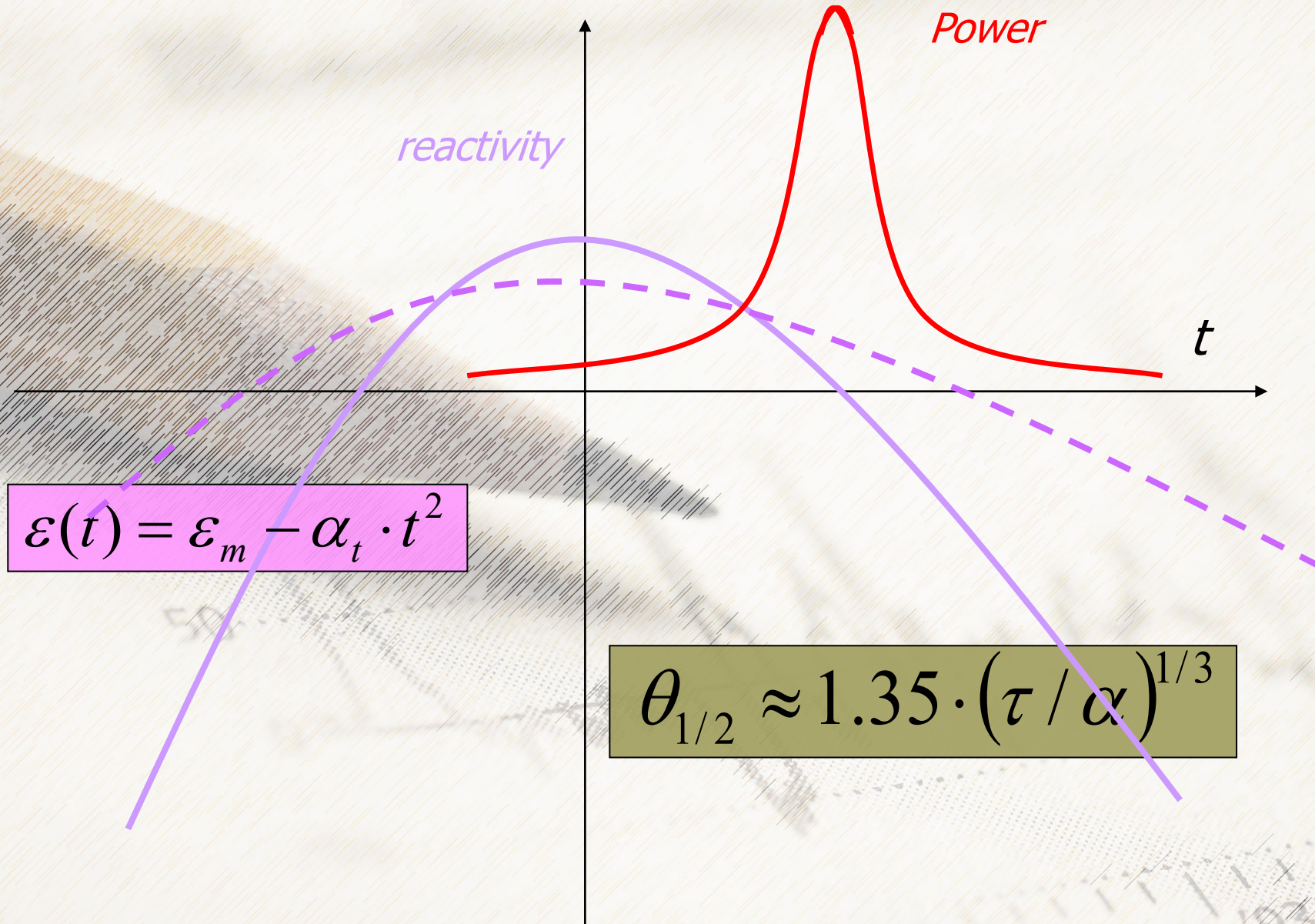
**Е.П. Шабалин , ЗНЧ- 2023**



# Изменение мощности (или потока нейтронов) в импульсных реакторах









# Из теории пульсирующего реактора (п.р.)

- Форма импульса мощности при параболическом ходе реактивности вблизи максимума была получена позднее с точностью не хуже 0.1% и отличается от Бондаренко-Стависского только коэффициентом  $2 L(B)$ , где сложная функция  $L$  параметра  $B$  мало отличается от единицы:

$$N(t) = S \cdot \frac{\sqrt{B\pi}}{\varepsilon_m} \cdot L(B) \cdot \exp\left\{-\frac{B\hat{t}^2}{3}(\hat{t}-3)\right\}$$

$$B = \varepsilon_m^{3/2} / a^{1/2} / \tau.$$

- Энергия импульса мощности  $Q$  пропорциональна  $\exp(4/3 \cdot B)$  и есть сложная функция от введенной реактивности  $\rho = \varepsilon - \varepsilon_m$ .

## К теории пульсирующего реактора (п.р.) :

*Бондаренко и Стависским была введена величина «импульсной доли запаздывающих нейтронов»  $\beta_{имп}$ , использование которой вместо эффективной доли запаздывающих нейтронов позволяет использовать уравнения кинетики обычного реактора для п.р. при малых возмущениях реактивности.*

Подход БиС был в дальнейшем обобщен на случай сильных возмущений реактивности с использованием того же понятия  $\beta_{имп}$ .

Линейная связь реактивности и энергии импульсов заменена экспоненциальной, что расширяет диапазон реактивности до единиц  $\beta_{имп}$ :

$$Q_n / Q_0 \approx \exp(\rho_n / \beta_{имп})$$



## Из кинетики пульсирующего реактора

Простейший случай отрицательной обратной связи:

$$k(t) = k \exp(-\alpha t),$$

$k$  - амплитуда импульсной функции обратной связи, т.е. "отклика" реактивности на импульс мощности с единичным энерговыделением:

$$k(t) = k \exp(-\alpha t),$$

а  $\varphi = k(T)/k = \exp(-\alpha T)$ , где  $T$  - период пульсации реактора

Для отношения реактивностей соседних импульсов при воздействии на реактивность **только температуры** нетрудно получить следующее уравнение :

$$\rho_{n+1} / \rho_n = \varphi \cdot (1 + k \cdot Q) = r$$

$$\rho < \beta_{\text{имп}}$$

Условие устойчивости

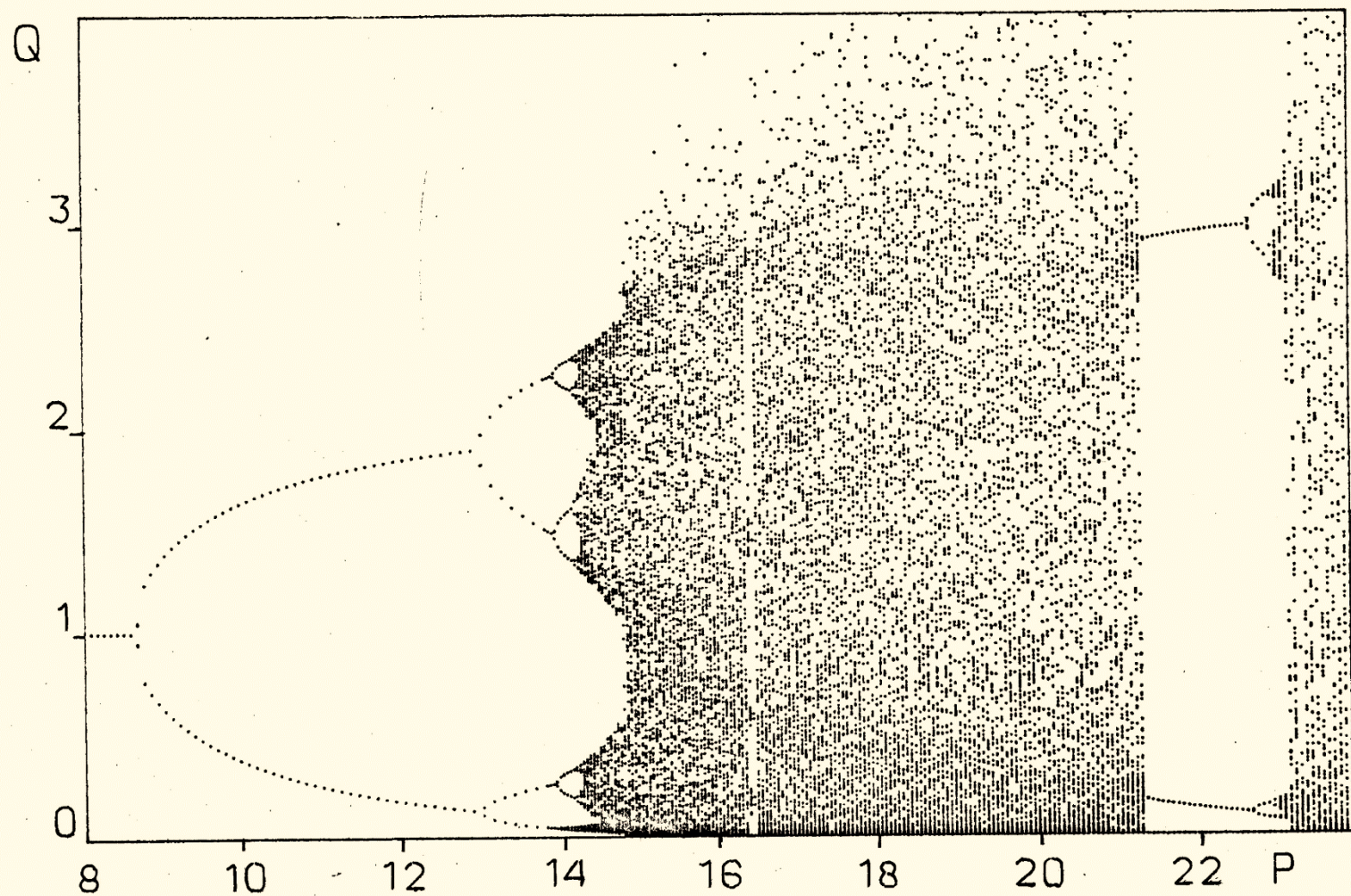
$$|r| \leq 1$$

При  $r < 0$  : Чередование знаков реактивности

Примечание: Это свойство по сути известное правило: положительная обратная связь возникает при чистом запаздывании отрицательной связи; период пульсации мощности и есть время запаздывания.



Энергия импульса относительно  
номинального



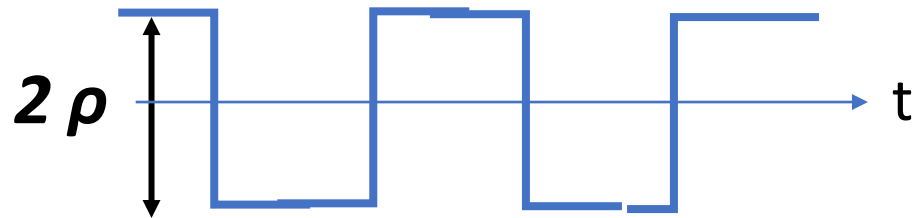
Парадоксально: чем сильнее  
температурная о.с.,  
тем раньше возникает  
сценарий Файгенбаума

P, МВт

«Детерминированный хаос» в реакторе типа ИБР-2  
при большой средней мощности (расчет).

- Первая особенность динамики п.р. – чередование знаков изменения реактивности. Соответственно, наличие половинной частоты.

Теперь обратимся к экспоненциальной зависимости  $Q_n / Q_0 = (\exp(\rho_n / \beta_{имп}))$  и посмотрим на динамику реактора при наличии колебаний реактивности с амплитудой  $\rho$  (в долях  $\beta_{имп}$ ):



Два импульса, приходящихся на один период колебаний:

Энергия одного:  $Q \exp(-\rho)$

Энергия соседнего:  $Q \exp(\rho)$

Среднее значение =  $Q[\exp(\rho) + \exp(-\rho)]/2 = Q \cosh(\rho) > 1!$

$$\cosh(\rho_n / \beta_{имп}) = [\exp(x) + \exp(-x)]/2 \approx 1 + x^2/2 + \dots > 1$$

И налицо вторая особенность п.р.:

Разгон п.р. в отсутствие отрицательной обратной связи.



Учитывая вышеназванные особенности пульсирующего реактора :

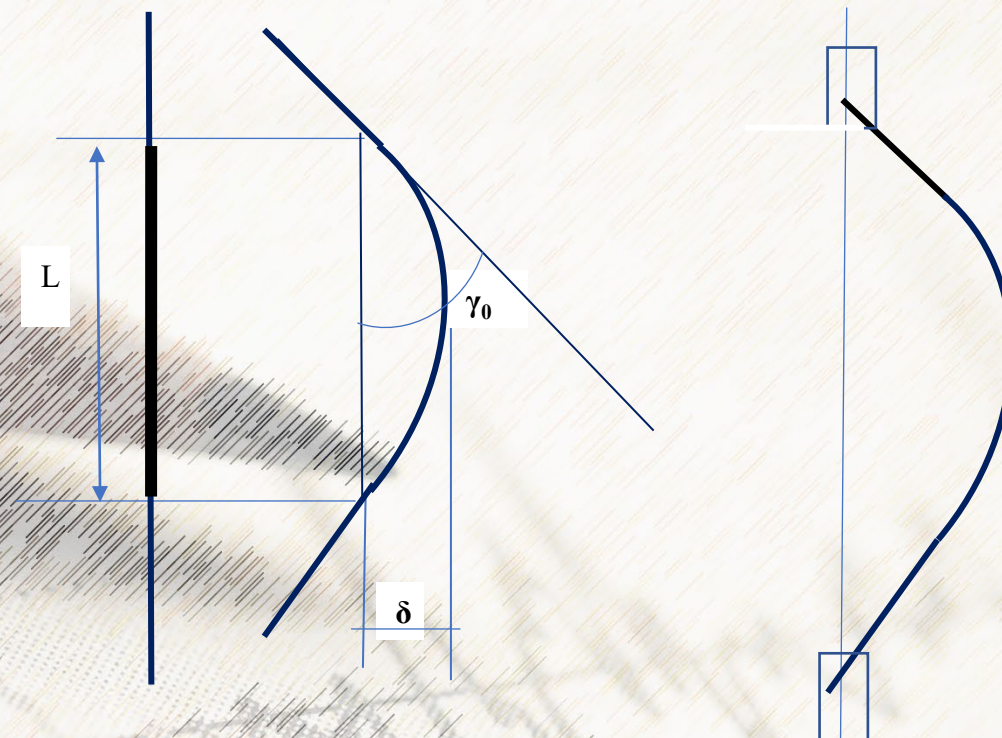
- **высокую чувствительность к реактивности,**
- **запаздывание отрицательной температурной обратной связи,**
- **положительный эффект реактивности от любых колебаний**

и имея в виду, что с мощностью реактора (энергией импульсов) колебания элементов реактора, как правило, усиливаются , нетрудно сделать заключение:

**наличие положительной обратной связи неизбежно в пульсирующем реакторе**



*Источник колебаний реактивности и энергии импульсов в пульсирующем реакторе - изгиб твэлов, нестационарный и динамический (т.е. инициируемый импульсами мощности).*



Дуга изгиба:

$$Y_{max} = \delta = \alpha \Delta T (L^2 / 8D)$$

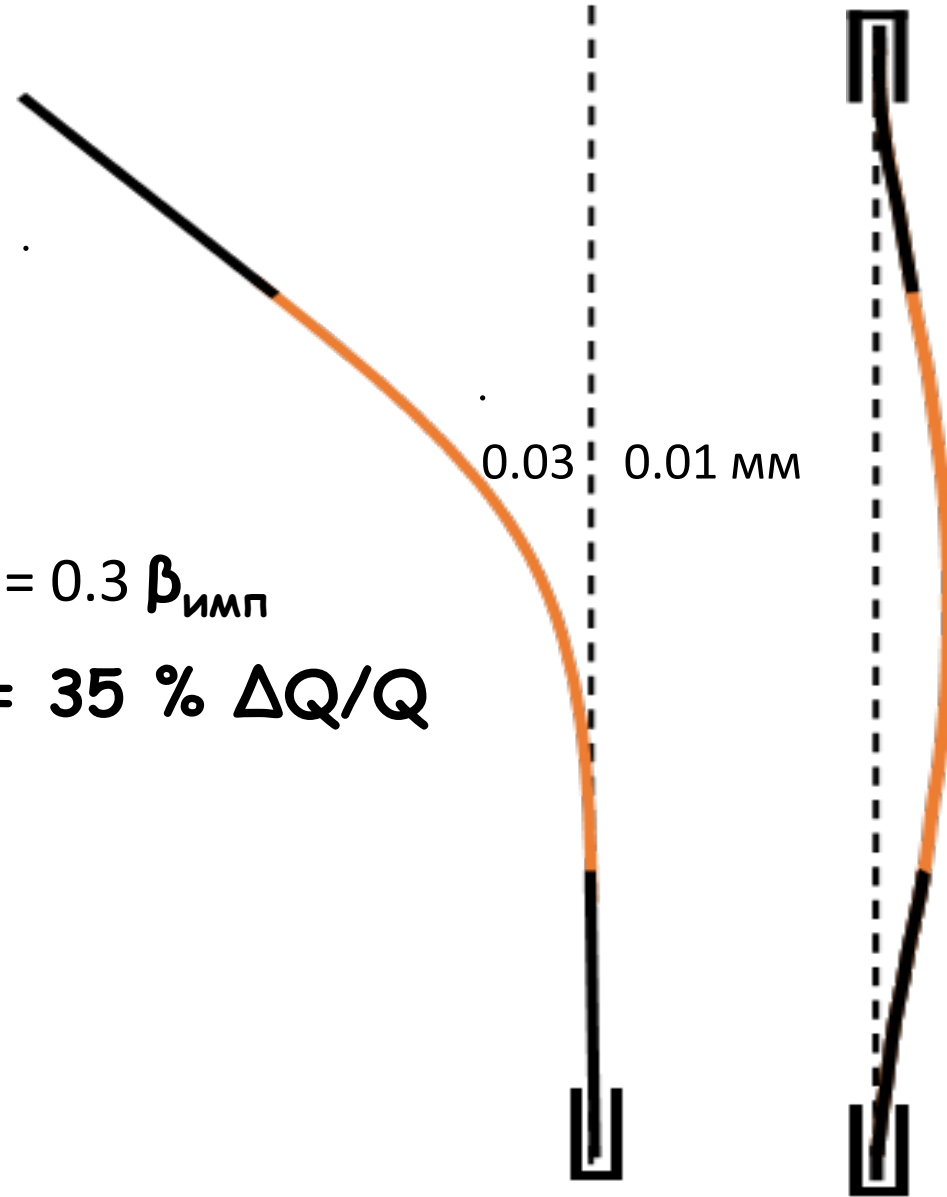
*Угол искривления концов твэла  $\gamma_0 = 2 \delta / L$  (рис.1). Форму кривой изгиба свободного твэла (на рисунке слева) назовем «естественной»; она полностью определяется геометрией твэла и разностью температур по диаметру оболочки.*

*Форма изгиба остается естественной и при достаточно свободной заделке на обоих концах при соблюдении условия  $d/l > \gamma_0$ , где  $d$  – диаметральный зазор в заделке, а  $l$  - глубина заделки, рис. справа*



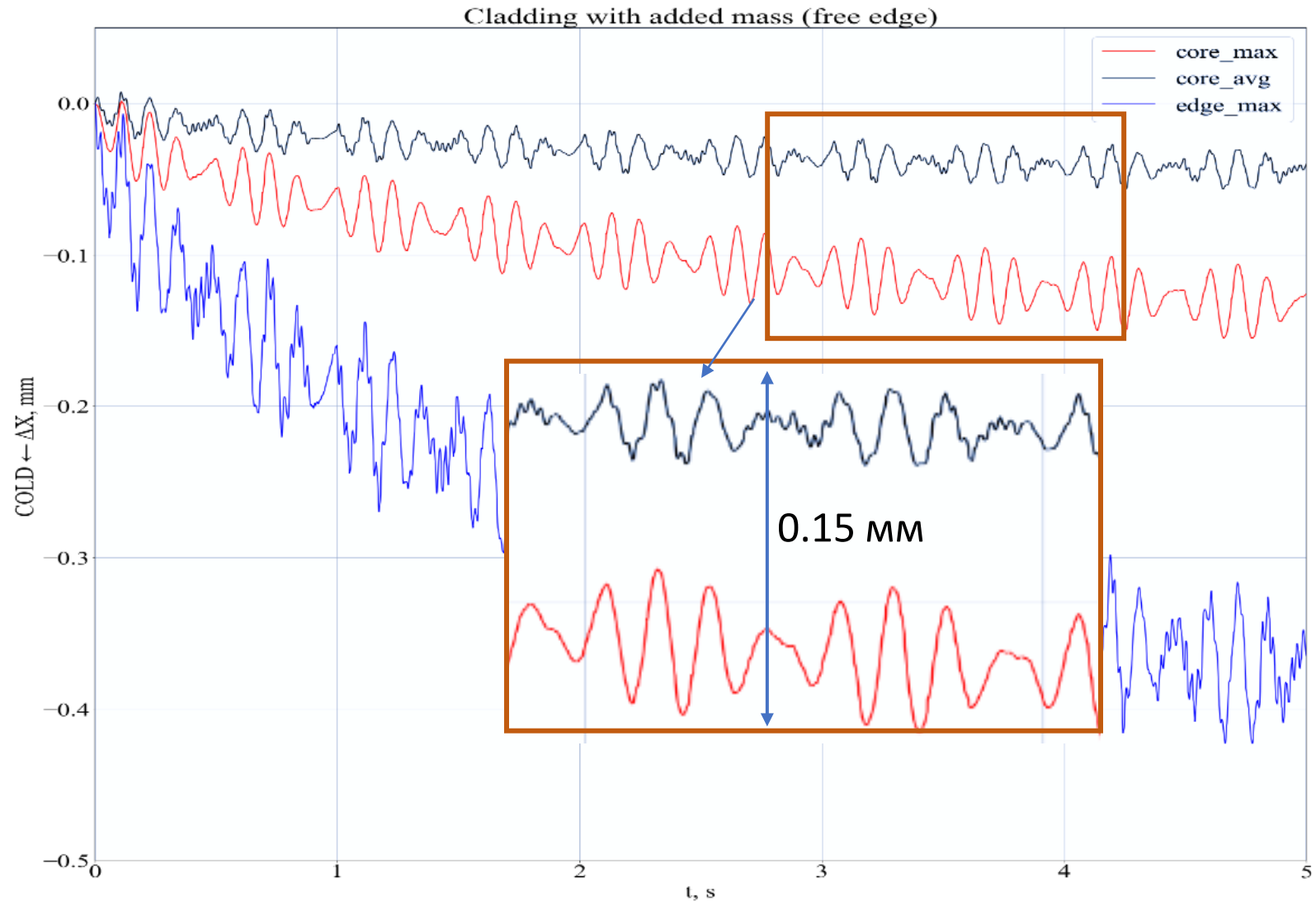
$$0.01 \text{ мм} = 0.3 \beta_{\text{имп}}$$

$$0.3 \beta_{\text{имп}} = 35 \% \Delta Q/Q$$





# Колебания твэла НЕПТУНА при одном свободном конце





## Оценка устойчивости п.р.

Без колеблющихся элементов  
и для линейной связи  
реактивности и мощности

$$\rho_{n+1} / \rho_n = \varphi \cdot (1 + k \cdot Q) = r$$

Без этих ограничений  
в случае одного колеблющегося  
элемента или синхронных колебаний  
(приближенное соотношение )

$$\varphi \cdot e^{\gamma T} \cdot \text{ch}(k_b T) < 1$$

$\gamma$  — температурный коэффициент реактивности,  $\beta_{\text{имп}}/K$

$T$  - нагрев за номинальный импульс

$K_b \cdot T$  - амплитуда колебаний реактивности при  
величине импульсов  $T$  ;

$K_b = f(\nu, \tau)$  - функция частоты собственных колебаний и  
времени их затухания

Для проекта НЕПТУН  $K_b$  порядка 0.04- 0.10; 0.13 – критическое значение



## *Динамика пульсирующего реактора НЕП ТУН: состояние дел на текущий момент, проблемы.*

Интенсивные расчетные исследования динамики приходится на 2021 -2022 год - издано более 20 статей, докладов и отчетов .  
Из них -7 - для Снежинска.

*В этот период получены следующие новые данные :*

- 1. Пульсирующие реакторы имеют три принципиальных особенности, усугубляющие нестабильность реактора большой мощности.*
- 2. В динамике пульсирующих реакторов типа НЕП ТУН (нагрев за один импульс  $> 10$  К) определяющую роль для стабильной работы играет **динамический изгиб ТВЭЛОВ** .*

3. Колебания при динамическом изгибе имеют сложный характер (комбинация нескольких мод), и возможен только численный расчет деформаций и реактивности. Простые приближения (типа одночастотного осциллятора) не дают надежного предсказания стабильности реактора; аналитическая приближенная оценка стабильности в общем виде пока не получена.

4. Установлено, что уровень стабильности по мощности зависит от следующих параметров:

1. Конструкции твэла и типа его крепления в опорах
2. Уровня мощности
3. Частоты пульсации мощности и собственных частот поперечных колебаний твэла,
4. температурного эффекта реактивности,
5. времени затухания колебаний
6. Величины  $\beta$ -импульсной.

5. Проблема: экспериментальное подтверждение расчетных исследований, в том числе, на импульсных реакторах ВНИИТФ



## Резюме:

Проведенные аналитические расчеты нестационарной температуры и динамического изгиба твэла на примере композиции одиночных твэлов (частично доложено на Снежинской конференции в июне 2021) и упрощенный анализ динамики по этим данным показали, что величина флуктуаций мощности определяется **формой и величиной изгиба твэлов, а также частотой собственных изгибных колебаний.**

**Симметричные колебания вносят положительную составляющую в мощностной коэффициент реактивности, независимо от знака реактивности статического изгиба твэлов. .**

**Эта реактивность кажется виртуальной, но реально проявляется как положительная обратная связь и способствует неустойчивости.**

**Влияние собственных колебаний затруднительно оценить аналитически.**

Программа численно-аналитического расчета динамики пульсирующего реактора, о которой будет следующий доклад, позволила это сделать.



КОНЕЦ ?