

Забабахинские Научные Чтения 2023

Расчёты динамики мощности периодического импульсного реактора НЕПТУН. Проблема неустойчивости.

Верхоглядов Александр Евгеньевич



Лаборатория Нейтронной Физики им. И.М. Франка
Объединенный Институт Ядерных Исследований

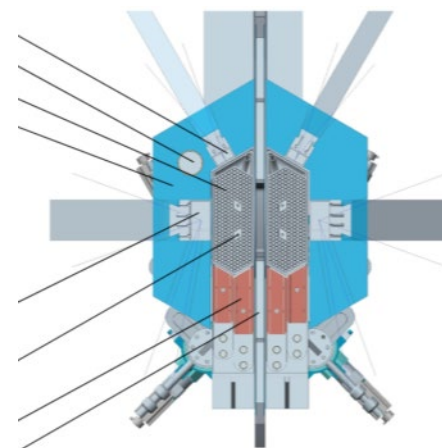
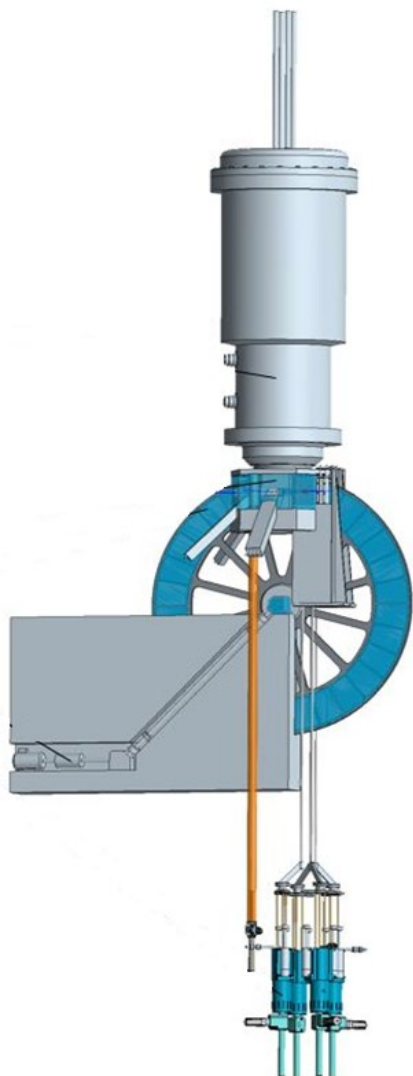
Дубна – Снежинск 1.06.2023

Проект импульсного реактора НЕПТУН.



Параметры реактора НЕПТУН

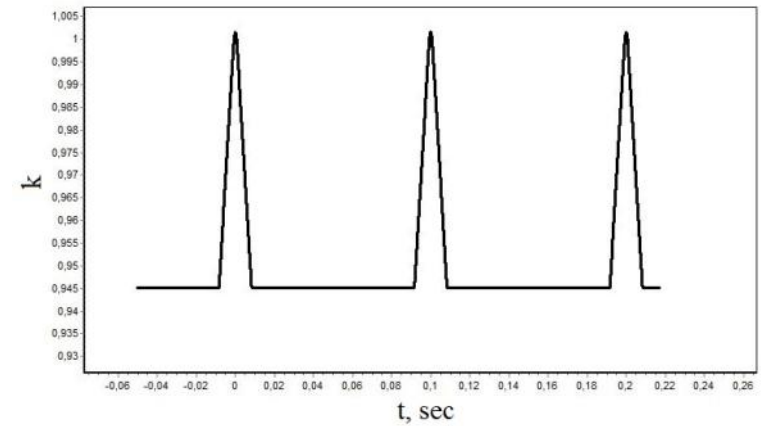
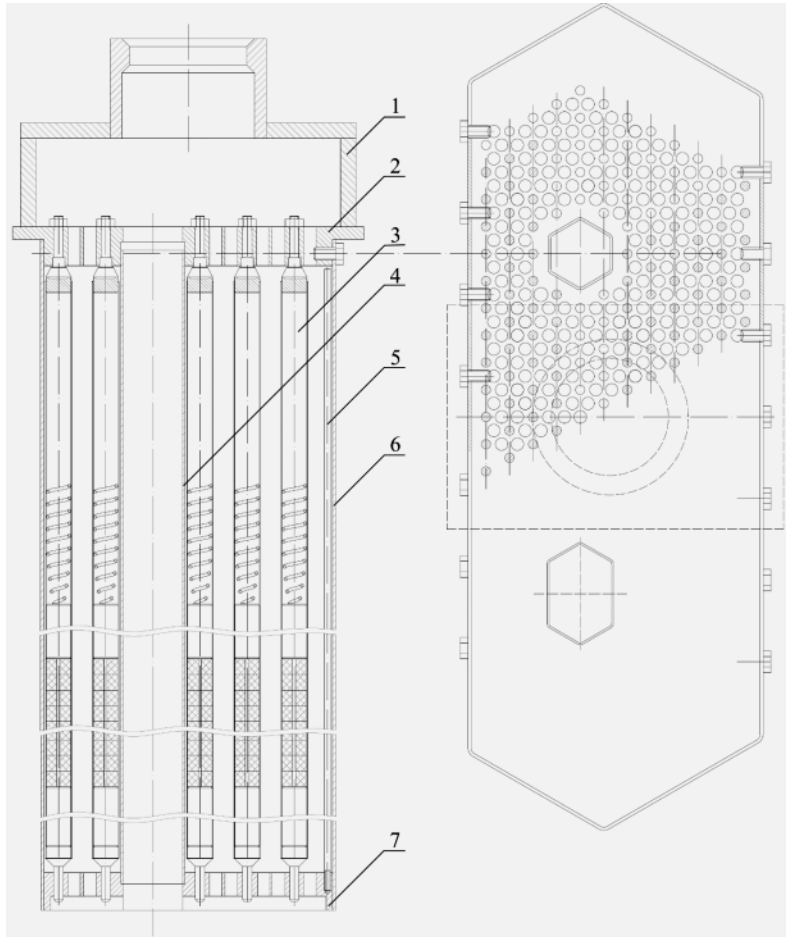
Параметр	Значение
Тепловая мощность	10-15 МВт
Частота импульсов	10 имп/сек
Средняя по времени ППТН на поверхности замедлителя	$(0.8 - 1.5) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
Фоновая мощность	2 -2.5 %
Длительность импульса быстрых нейтронов	~250 мкс
Топливо	NpN
Теплоноситель, температура	Натрий, 290-390 ⁰ С
Длительность кампании без перегрузки, 4% т.а.	40000 час
Ресурс реактора (по корпусу активной зоны)	20000-25000 МВт·сут
Замедлители, предзамедлители	Вода, мезитилен, бериллий



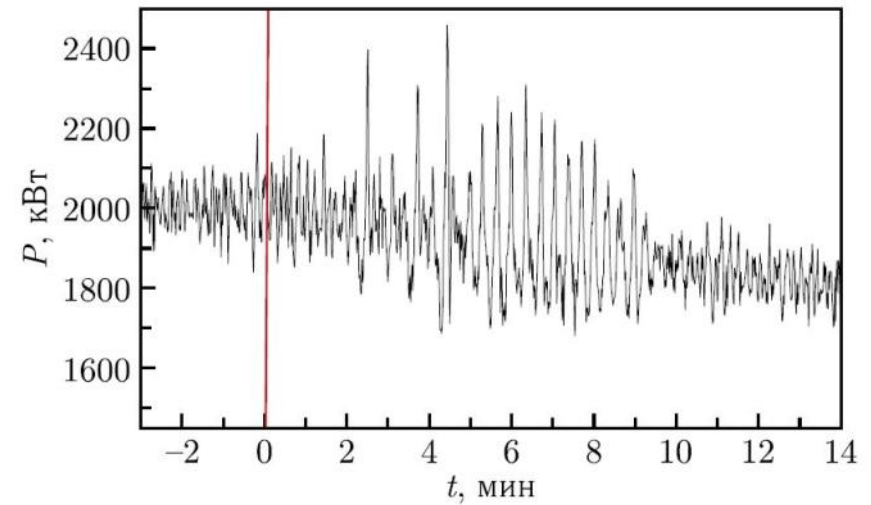
Проблема флуктуаций мощности.



модулятор

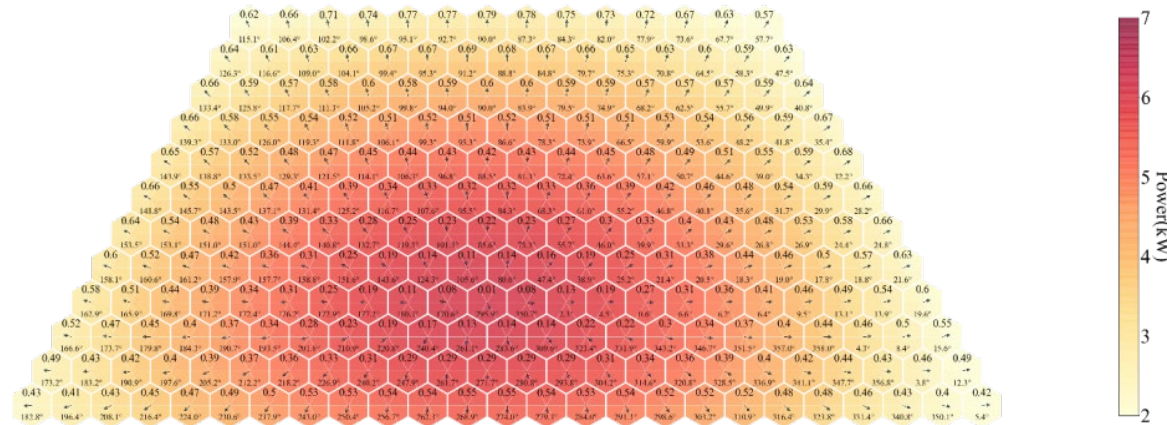
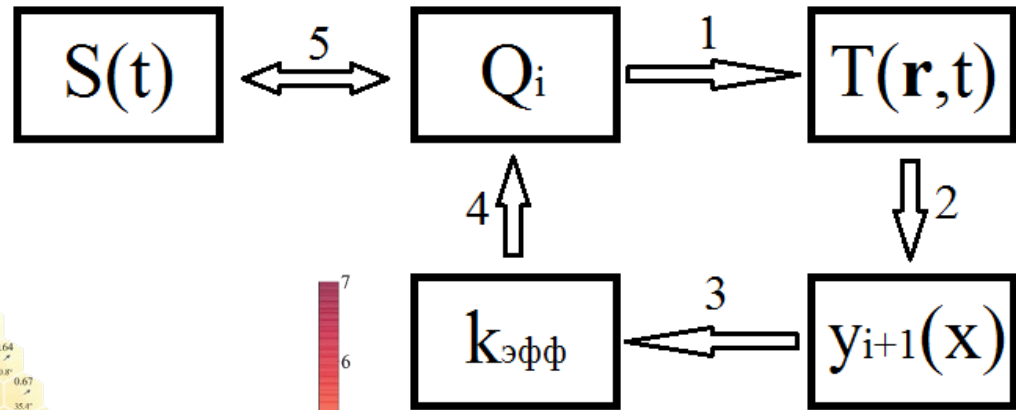


ИБР-2, 2017 г.



Расчёты динамики импульсного реактора «Нептун».

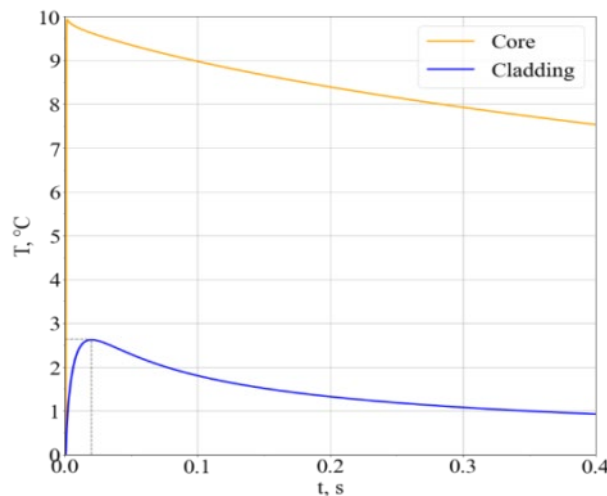
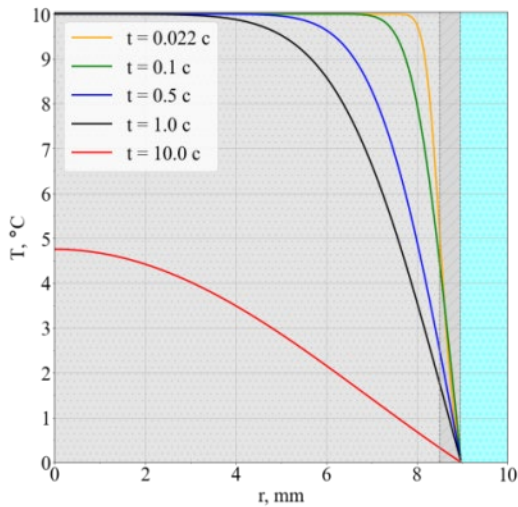
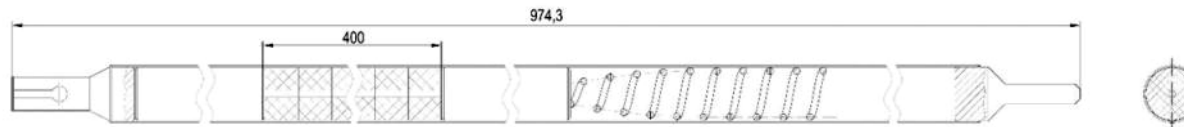
Модель динамического изгиба.



1. Распределение температуры в топливе и оболочке твэла $T(r,t)$ (теплопроводность)
2. Динамический изгиб твэла под действием нестационарной температуры (термоупругость)
3. Изменение реактивности $k_{эфф}$ при поперечной и продольной деформации твэла (MCNP)
4. Расчёт импульса мощности Q_i в односточечной модели кинетики реактора
5. Расчёт источников запаздывающих нейтронов $S(t)$ (восьмигрупповое приближение)

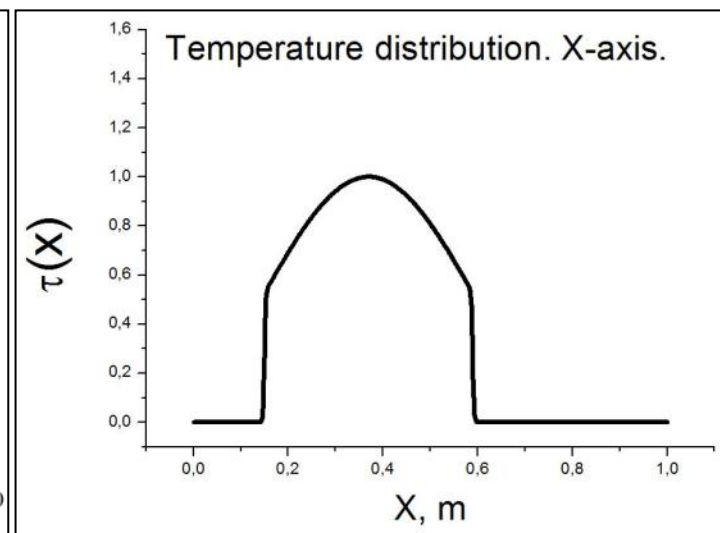
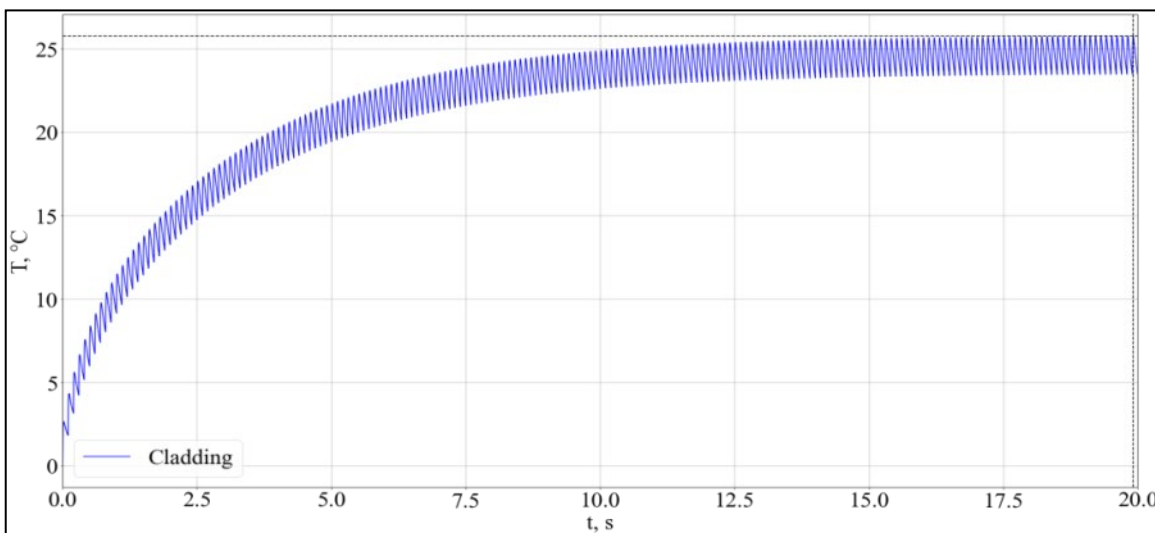
Расчёты динамики импульсного реактора «Нептун».

Теплопроводность.



$$\frac{\partial T(t, r)}{\partial t} - a \Delta T(t, r) = f(t, r)$$

$$\beta(t) = \sum_{j=i}^{i-200} T_{shell}(0,1 \cdot (i-j) + t') \cdot q_j$$

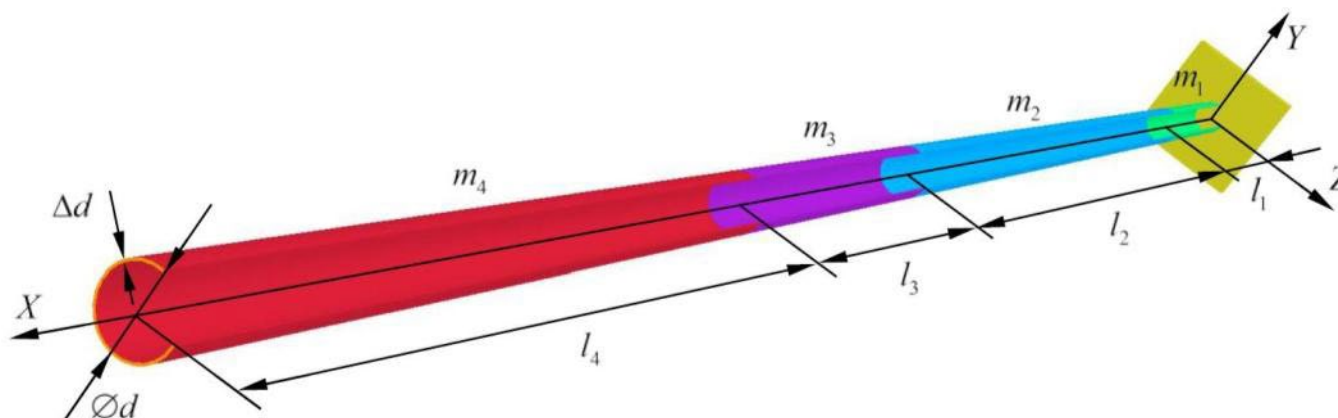


Расчёты динамики импульсного реактора «Нептун».

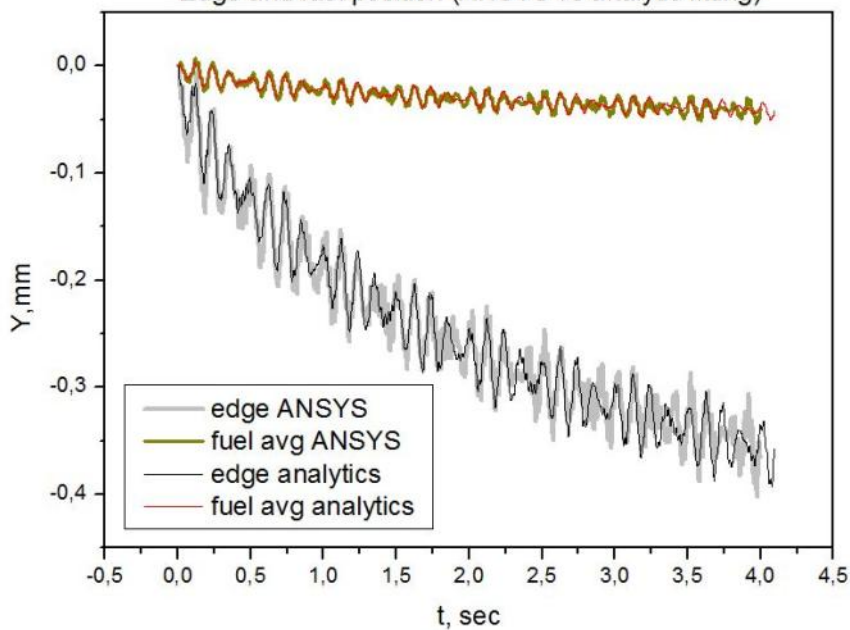
Термоупругость.



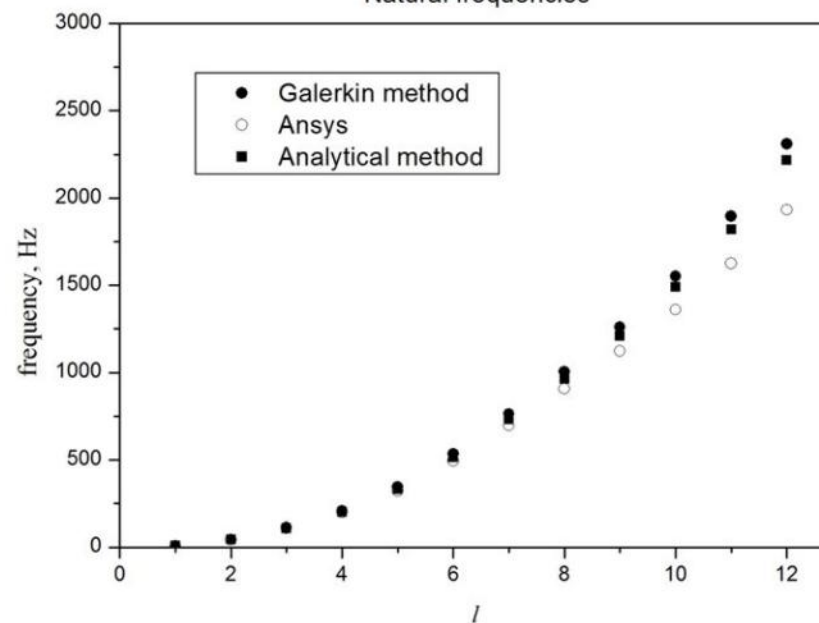
$$\mu \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EJ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + EJ \alpha_t \frac{\varphi T}{d} \right) + \eta d \frac{\partial y}{\partial t} = 0$$



Edge and fuel position (ANSYS vs analytic fitting)



Natural frequencies



Расчёты динамики импульсного реактора «Нептун». Реактивность. MCNP.

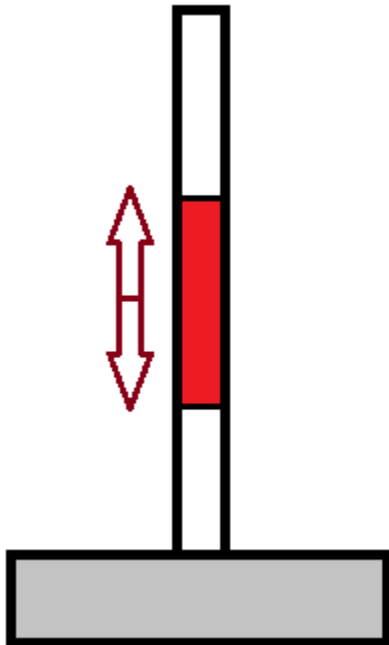


Реактивность продольных деформаций

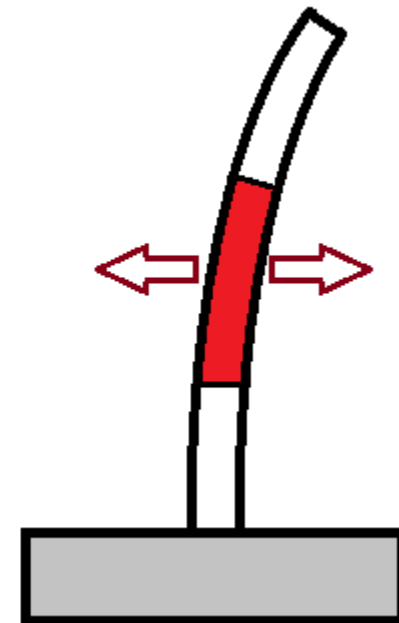
Реактивность поперечных деформаций

$$\Delta k_{axial} = 5 \cdot 10^{-6} \Delta T_f$$

$$\Delta k_{cross} = 0.002 \int y(x) \Phi(x) dx, \quad \Phi(x) \sim \cos^2$$



$$\Delta k = \Delta k_{cross} - \Delta k_{axial}$$



Расчёты динамики импульсного реактора «Нептун».

Нейтронная кинетика.



одноточечная модель

$$\dot{w}(t) = \frac{1}{\tau} \left(w(t) [k - 1] + \frac{S}{\nu} \right),$$

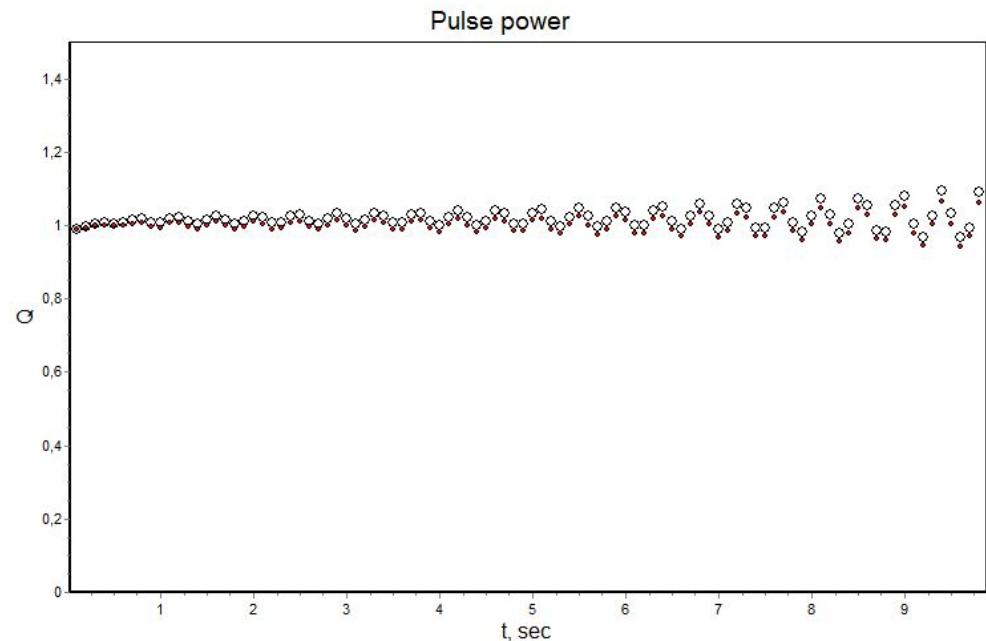
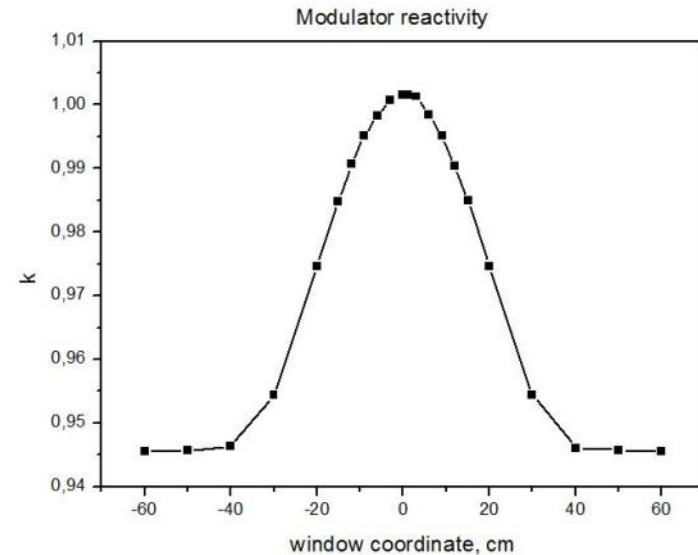
$$S = \sum_{i=1}^8 c_i(t) \lambda_i,$$

$$\dot{c}_i(t) = -\lambda_i c_i(t) + w(t) \nu \beta_i.$$

Группа	$T_{1/2}, c$	λ, c^{-1}	β_i
1	55,6	0,0125	0,00448
2	24,5	0,0283	0,10639
3	16,3	0,0425	0,02198
4	5,21	0,133	0,07782
5	2,37	0,292	0,19135
6	1,04	0,666	0,01040
7	0,424	1,63	0,07558
8	0,195	3,55	0,01183
Сумма			0,49983

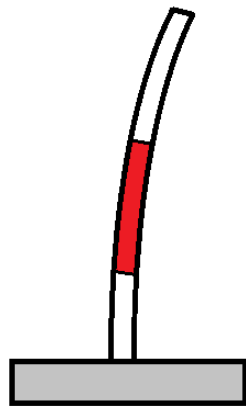
Приближение $S = \text{const}$

$$Q = \frac{\pi S B \tau}{(k - 1)^2} \exp\left(\frac{4}{3} B\right), \quad B = \frac{(k - 1)^{3/2}}{\nu \tau \sqrt{\alpha}}$$

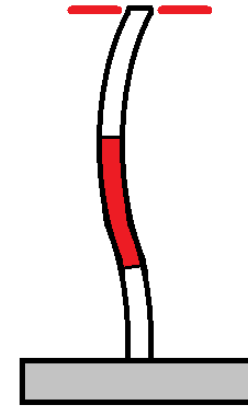


Расчёты динамики импульсного реактора «Нептун».

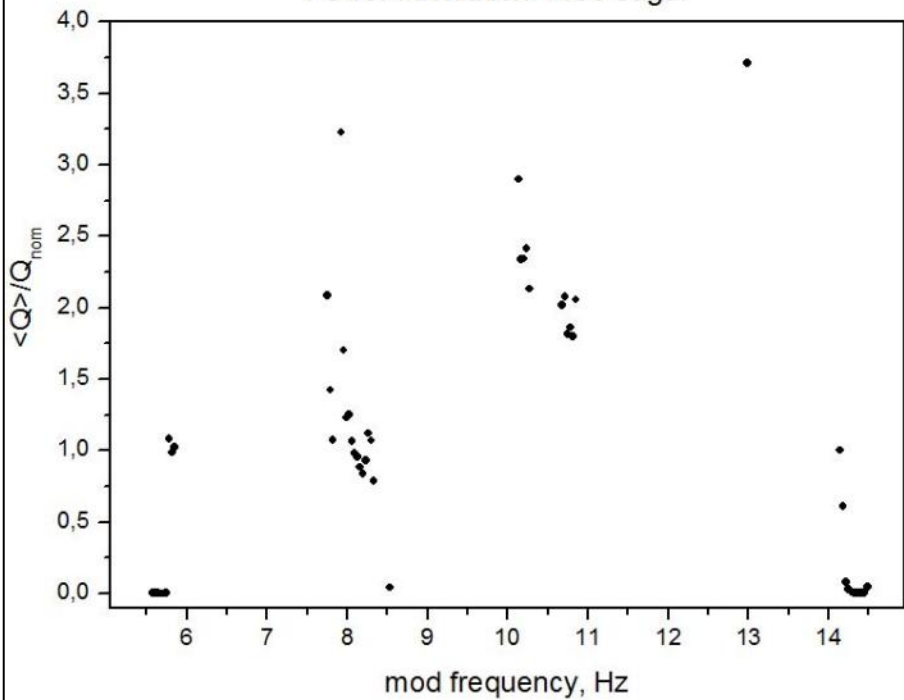
Первые результаты.



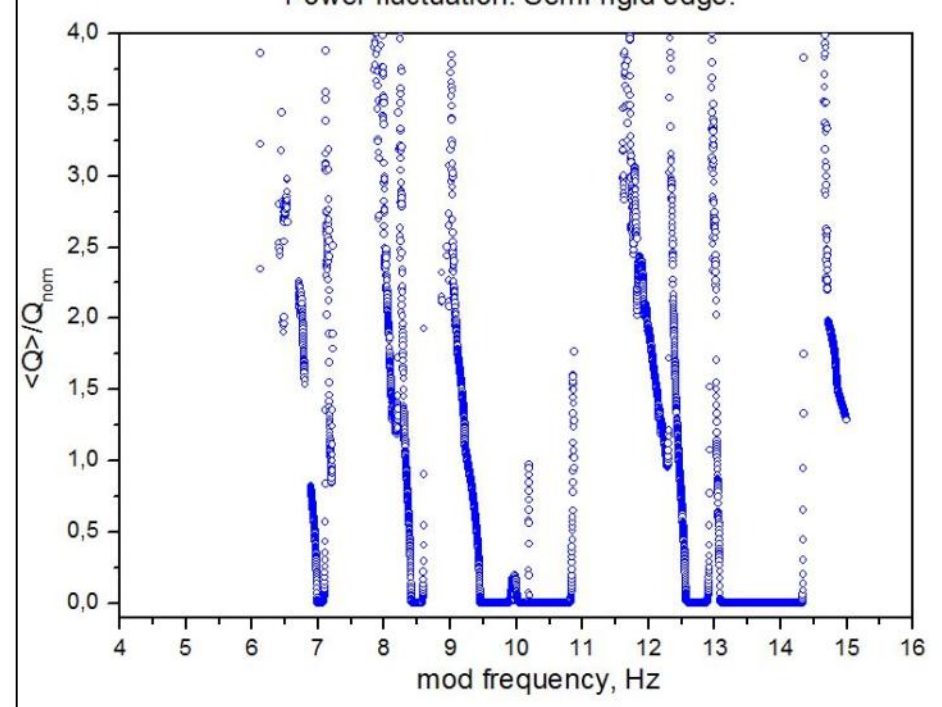
Время затухания 5 секунд



Power fluctuation. Free edge.



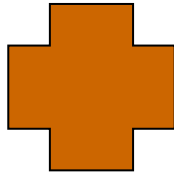
Power fluctuation. Semi-rigid edge.



Достоинства и недостатки



- ✓ **Реализованный алгоритм учитывает нестационарную температуру, деформацию твэлов, запаздывающие нейтроны.**
- ✓ **Благодаря аналитическим решениям и оптимизации удалось достичь высокой скорости вычислений.**
- ✓ **Модель предполагает модификацию и усложнение (ансамбль твэлов, разные ГУ, 3D и др.)**
- **Алгоритмы и параметры модели требуют экспериментальной проверки (трение, температура, собственные частоты).**
- **Не учитывается гидродинамика.**
- **Принятые допущения: одиночный твэл, расчёт Δk , упрощённая модель твэла.**



Теория

- Рассмотрение ансамбля твэлов.
- Уточнение модели теплопроводности.
- Учёт движения теплоносителя.
- Трёхмерная геометрия.

Эксперимент

- Изготовление модельных твэлов.
- Имитация динамического изгиба (нейтроны, электронагрев).
- Виброакустические измерения твэлов (собственные частоты, трение, зависимость от температуры).
- Гидродинамические измерения (собственные частоты, трение, взаимодействие твэлов).