

*Теоретический (численно-аналитический)
расчет импульсной характеристики обратной
связи реактора ИБР-2М, 2023-2024 гг.*

Участники работы :

А. Верхоглядов, М. Подлесный

Я. Вдовин, Хасан Ахмед, И. Кушнир,
В. Верхоглядова

ноябрь - декабрь 2024
Е. Шабалин

Импульсная Характеристика Обратной Связи (и.х.о.с.) –
временной характер изменения $K_{эфф}$ в ответ на импульс энерговыделения.

Энергия импульса $Q_i = S_i \cdot M(\rho_i)$, ρ - надкритичность в импульсе

$$\rho_i = \rho_0 + \sum_{n=1 \dots \infty} [k(nT) \cdot Q_{i-n}]$$

T - период пульсаций

$k(nT)$ – это и есть и.х.о.с.

Типичная ИХОС реактора
ИБР-2 (черная кривая)
(«Кардиограмма»)



Греческое слово $\eta\chi\acute{\omega}$
переводится как
«отзвук, отголосок»
и произносится **ИХОС**

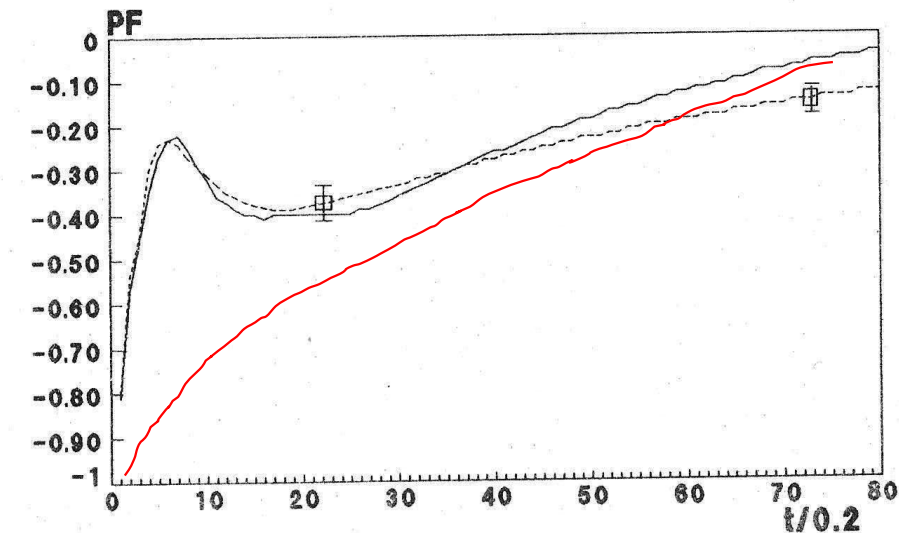


Рис. 3. Импульсная характеристика обратной связи в реакторе
ИБР-2, полученная по двум методикам:
— метод передаточной функции;
--- метод обратной задачи;

Расшифровка диаграммы календарного хода работ, представленной на следующем слайде

21 февраля – публично заявлено о возможности теоретического расчета ИХОС ИБР-2М; план завершить работу к 1 июня.

Май – кризис жанра: достигнутые результаты не впечатляют; что-то пошло не так. Изгиб ТВС необходим, но не достаточен для того, чтобы форма ИХОС способствовала автоколебаниям реактора. (*график двух компонент*)

К середине мая нечто проясняется, появляется надежда. В связи с этим даже опубликована небольшая заметка в еженедельнике ОИЯИ «Это же элементарно, Ватсон!» (*надежда на существенную роль процесса установления равновесного распределения температуры по сечению сердечника твэла*)

Сентябрь: второй кризис: *надежда рухнула*, т.к. А. Верхоглядов доказывает, что при быстром нагреве таблетки топлива изменяют форму, упругие деформации топлива нивелируют эффект.

13 октября: Найдена *третья причина правильной* структуры ИХОС – температурное расширение верхней части ТВС, «распухание зоны».

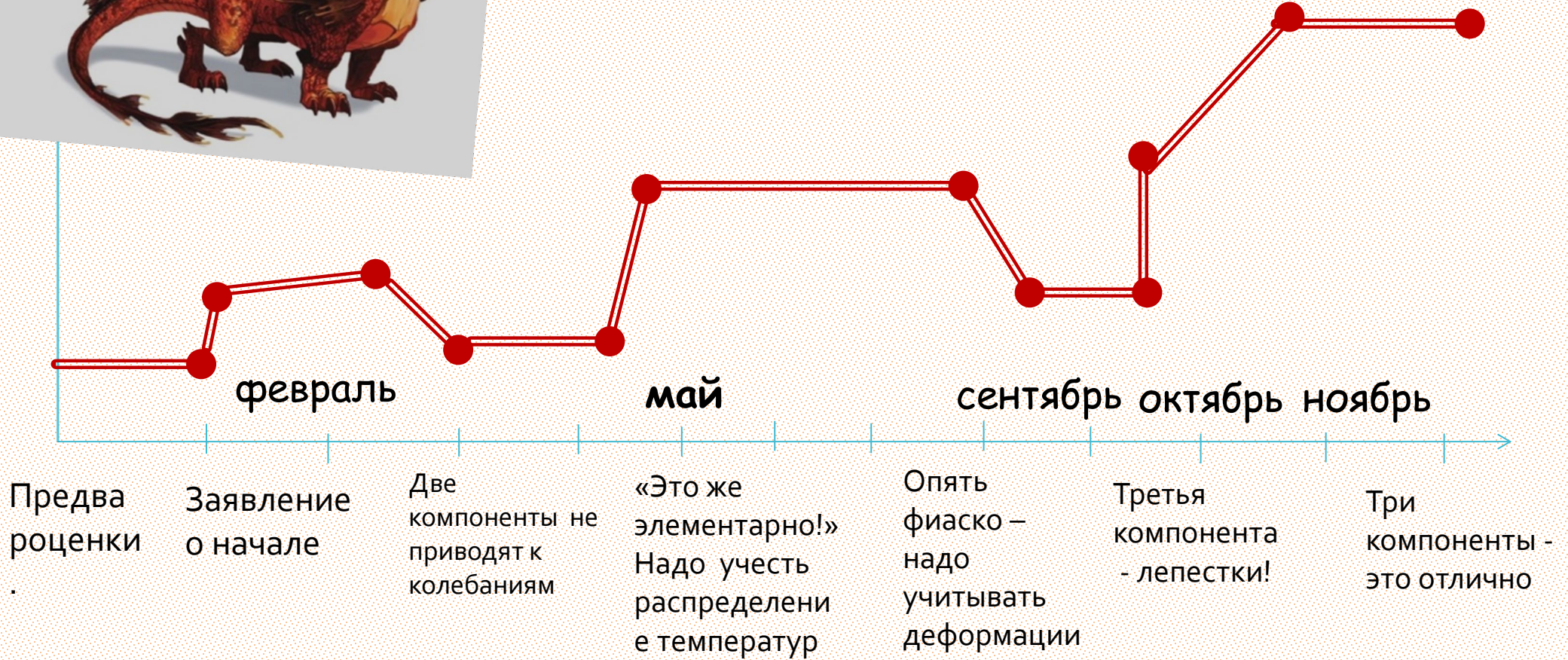
27 октября: Цель достигнута! Уточнение результатов, оценка погрешностей.

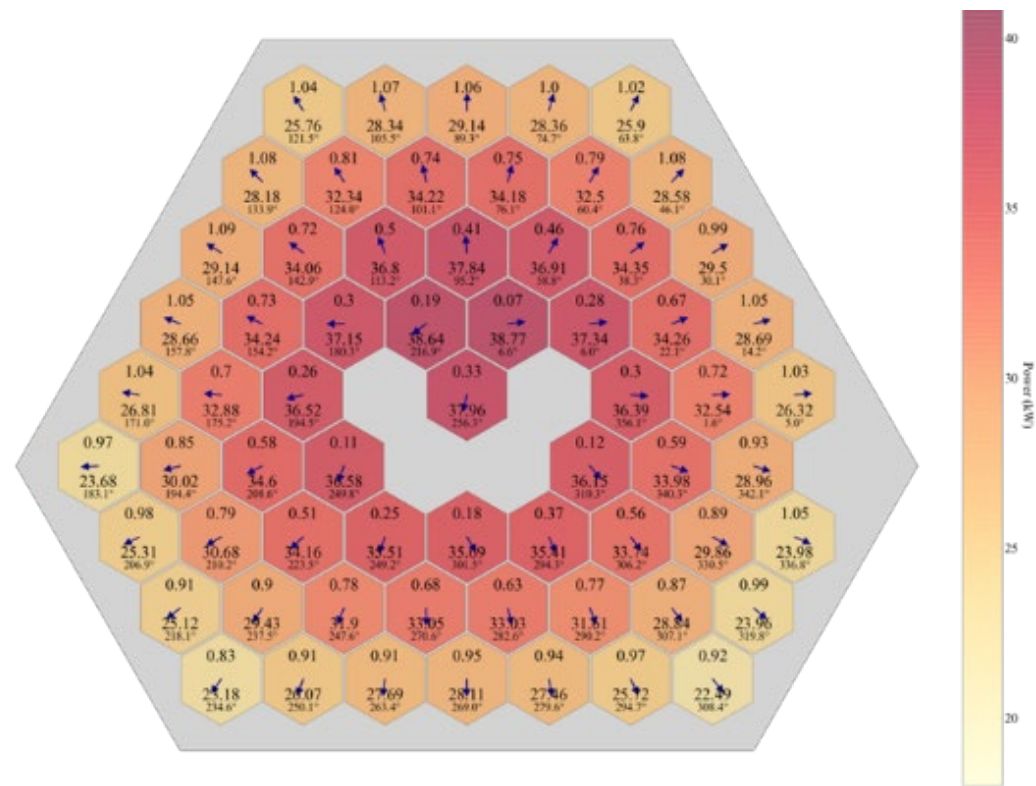
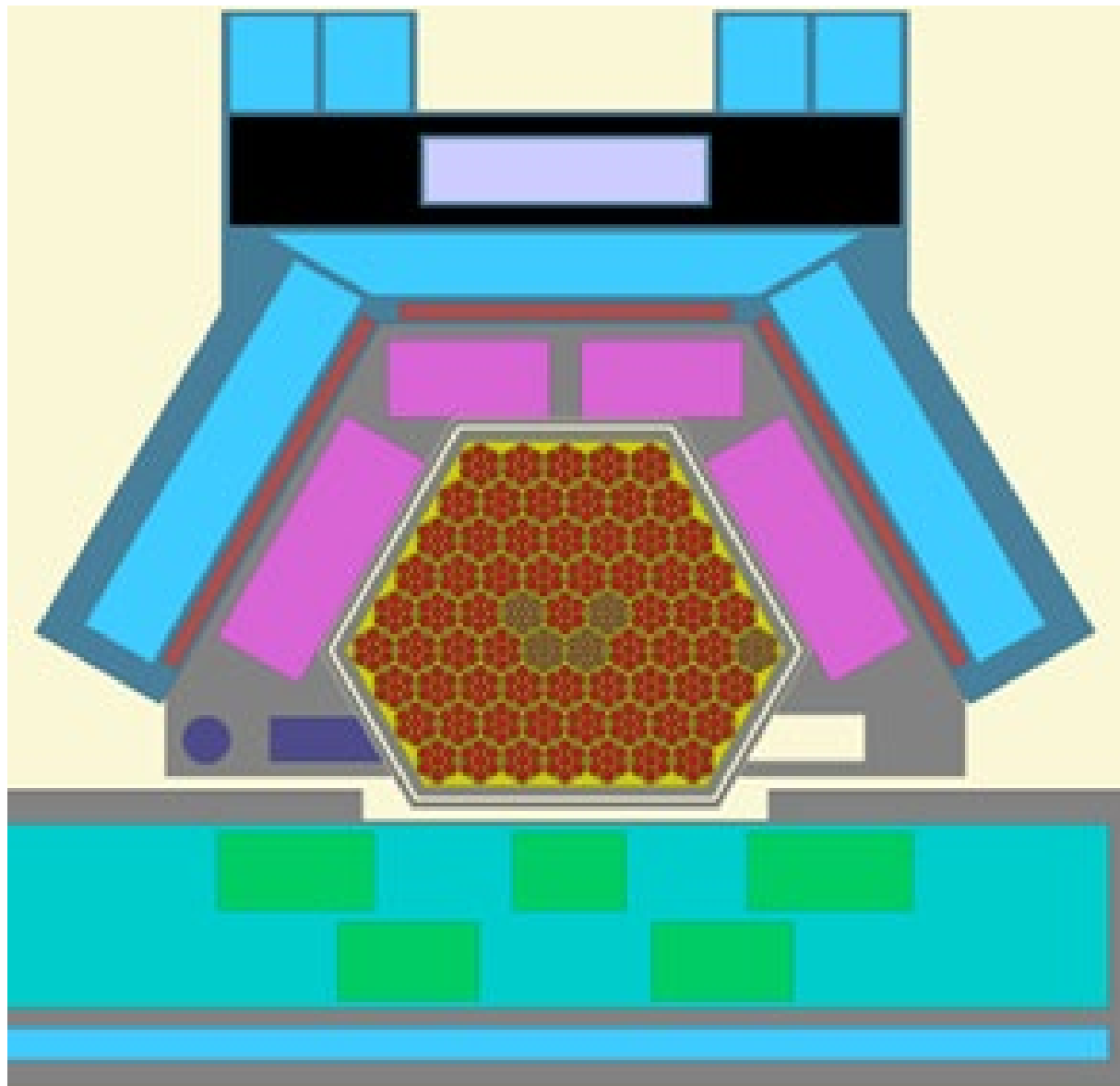
Ноябрь, декабрь: Отчеты, групповые семинары



2024 – год ихос ИБР-2М

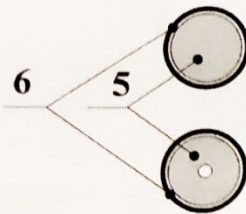
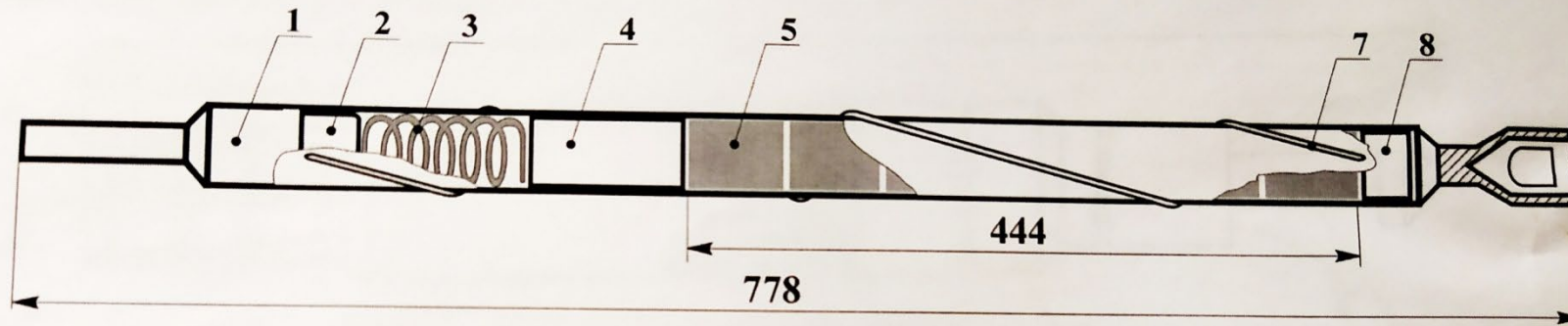
УРОВЕНЬ ПОНИМАНИЯ





2 МВт, 2011 г.

General drawing of the IBR-2 fuel rod



Section of Fuel rod stacked with solid pellets

Pellet with a hole 1,5 mm in the diameter in the fuel rod section

1 - Top bearing cap

2 - Lock of spring

3 - Compressing spring

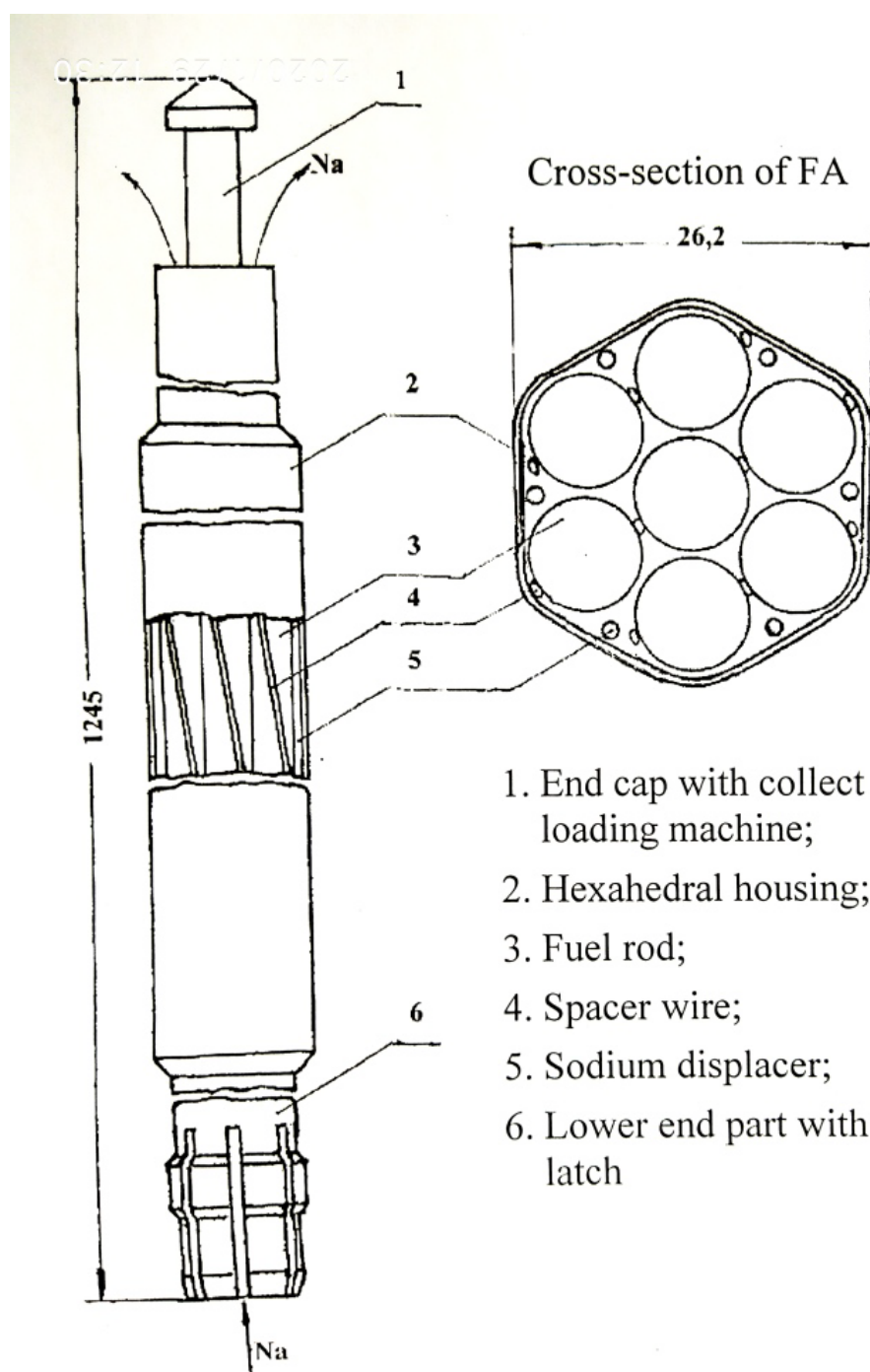
4 - Tungsten insert

5 - Fuel pellet

6 - Fuel rod cladding, $\text{Ø } 8,6 \times 0,45$

7 - Flat spacer wire

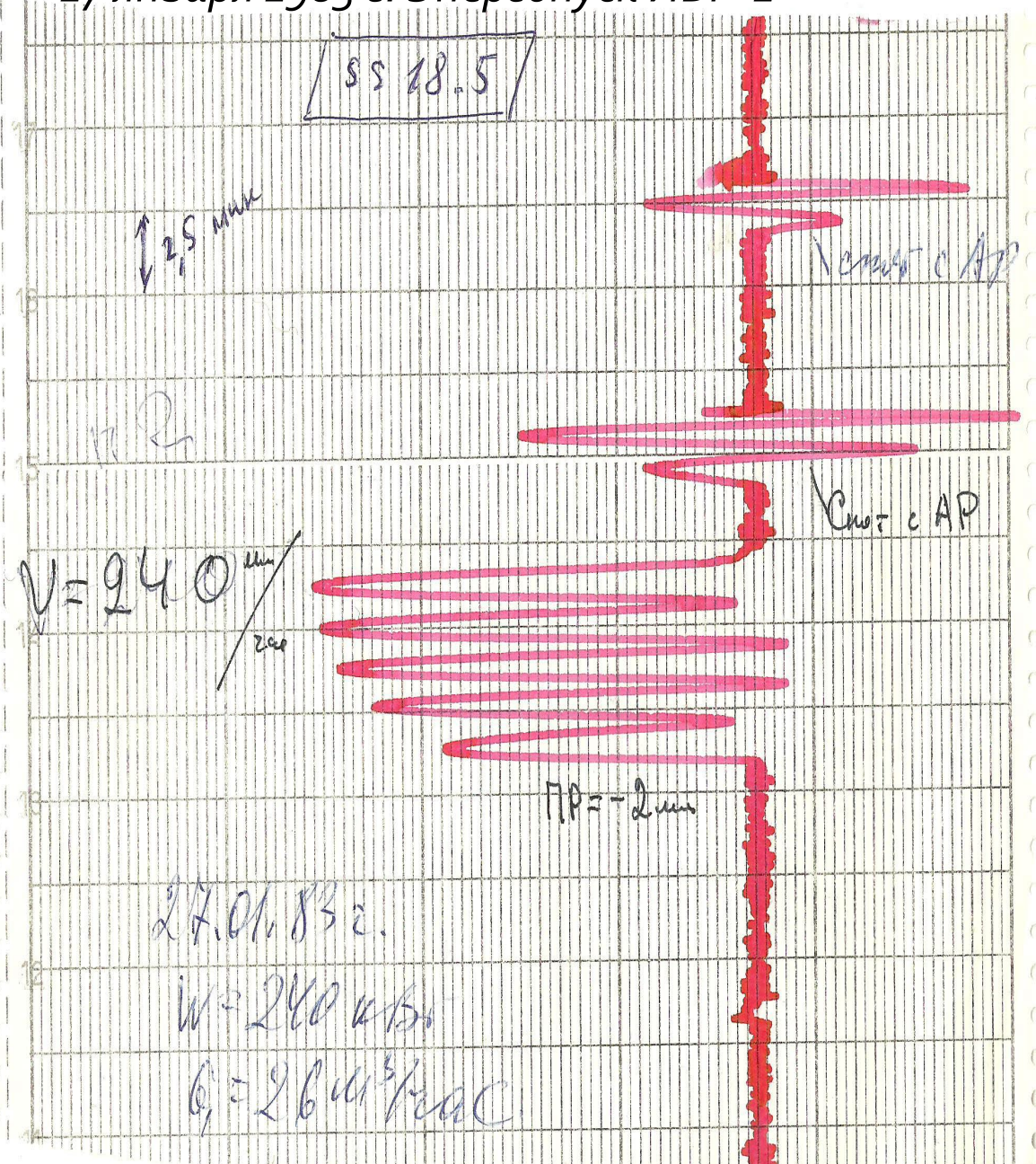
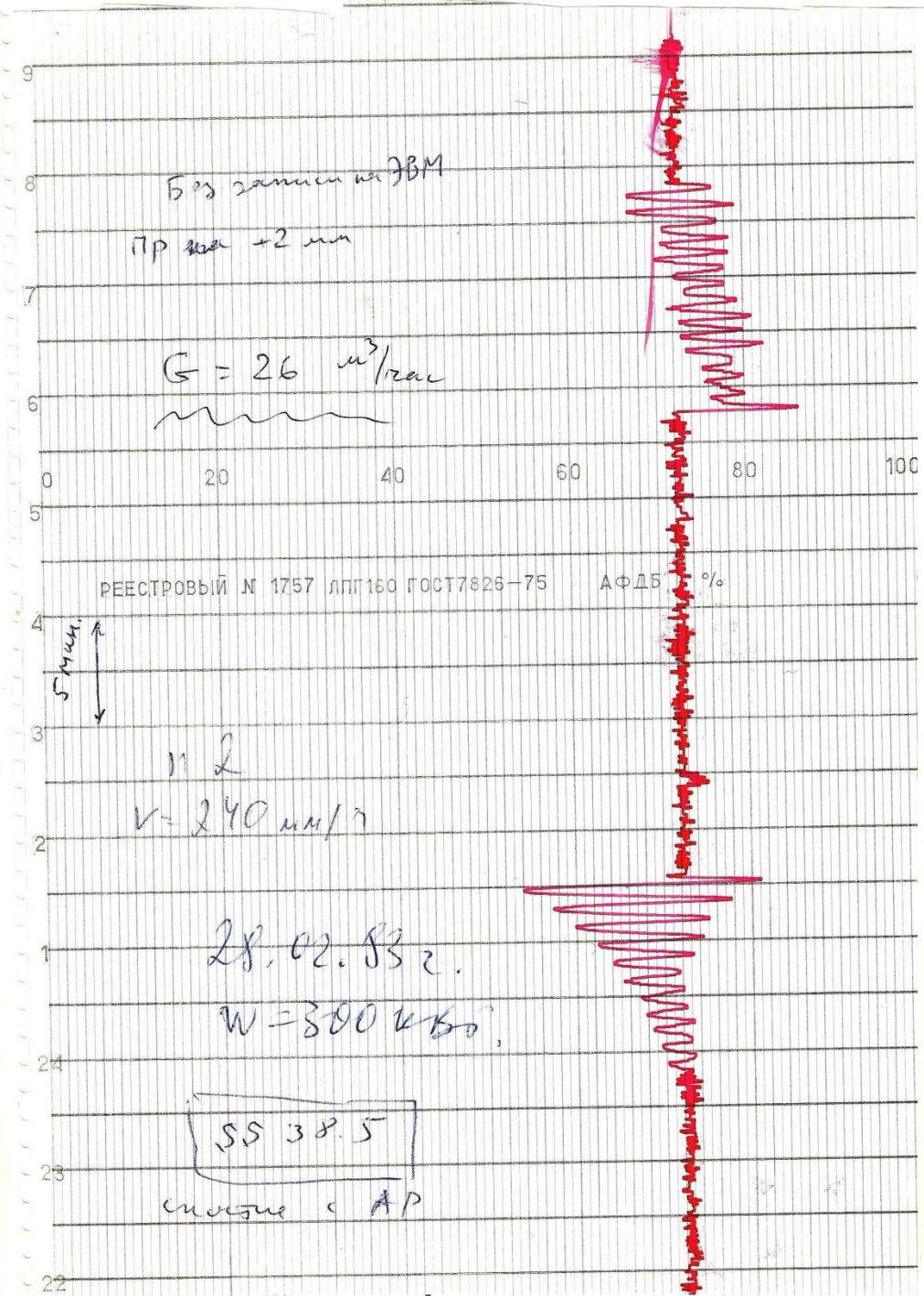
8 - Bottom cap



1. End cap with collect grip for the loading machine;
2. Hexahedral housing;
3. Fuel rod;
4. Spacer wire;
5. Sodium displacer;
6. Lower end part with a collet latch

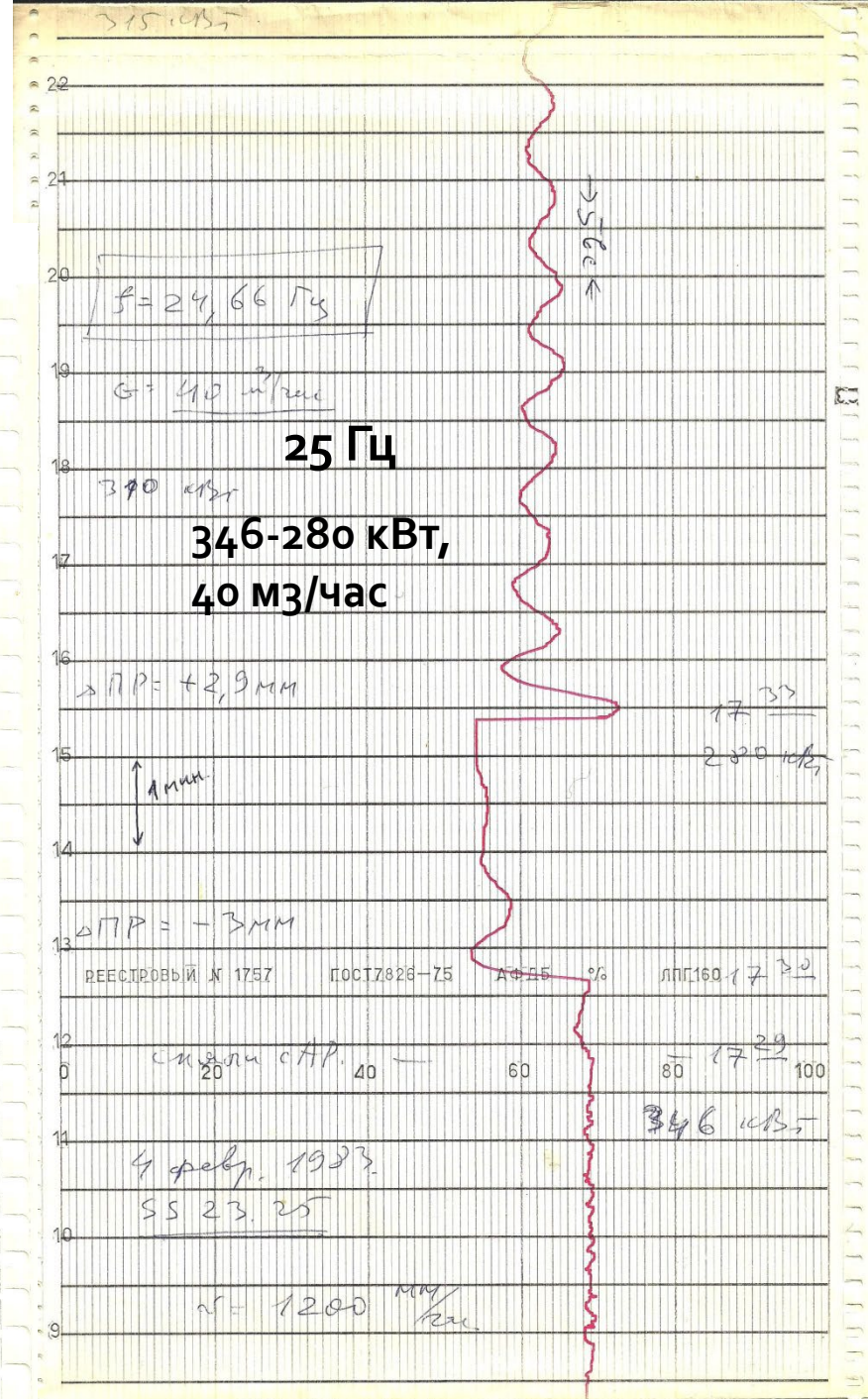
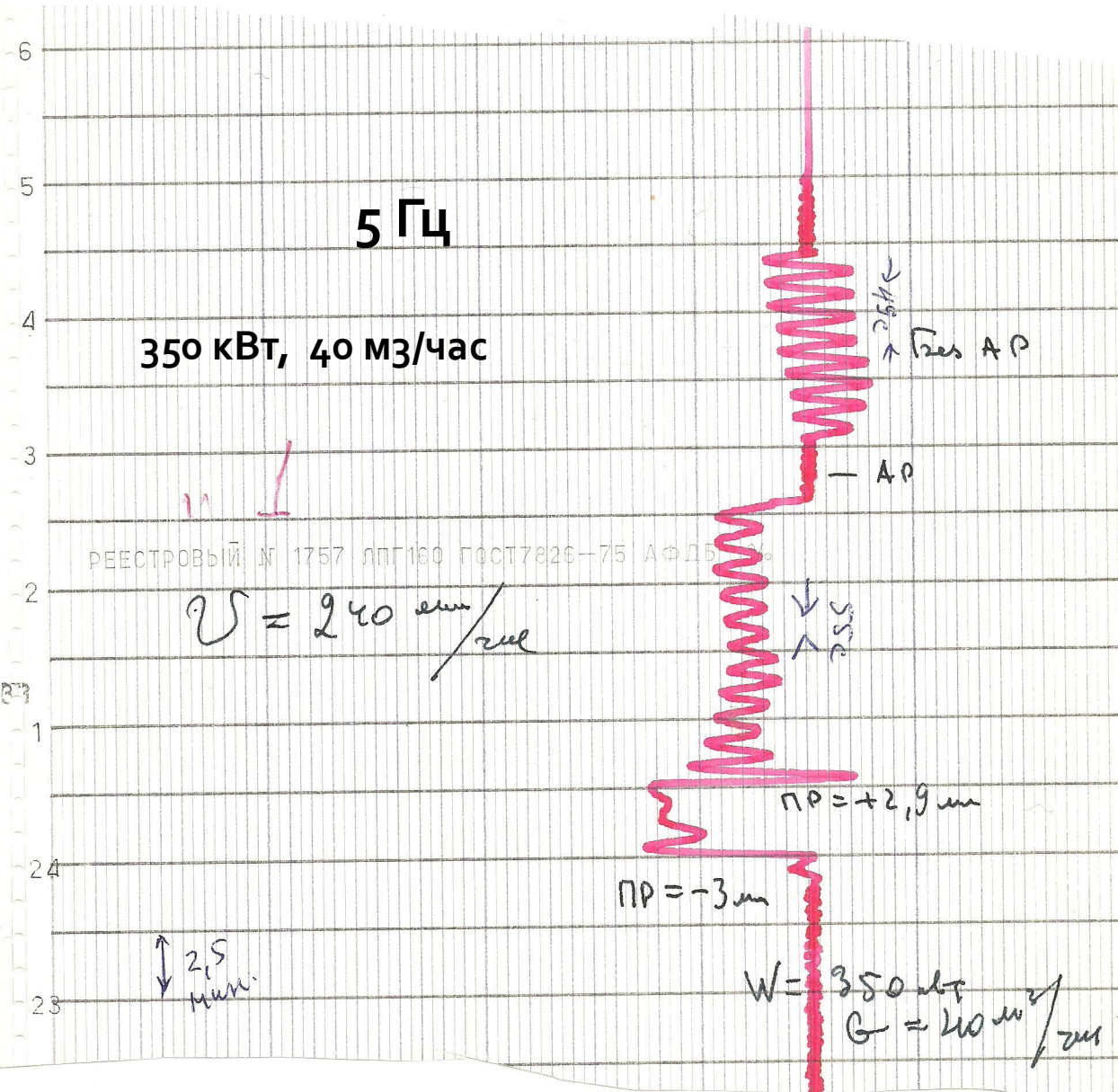
Отношение шага к диаметру
 $9.6/8.6 = 1.116$,
 а для Нептун (НИКИЭТ)
 $17.7/17 = 1.041$

Первые наблюдения автоколебаний
27 января 1983 г. Энергопуск ИБР-2



Нет зависимости от частоты импульсов!

(Представляемые расчеты подтвердили это)



PF - в единицах $\beta_{И}/\text{МДж}$; время t - в сек.

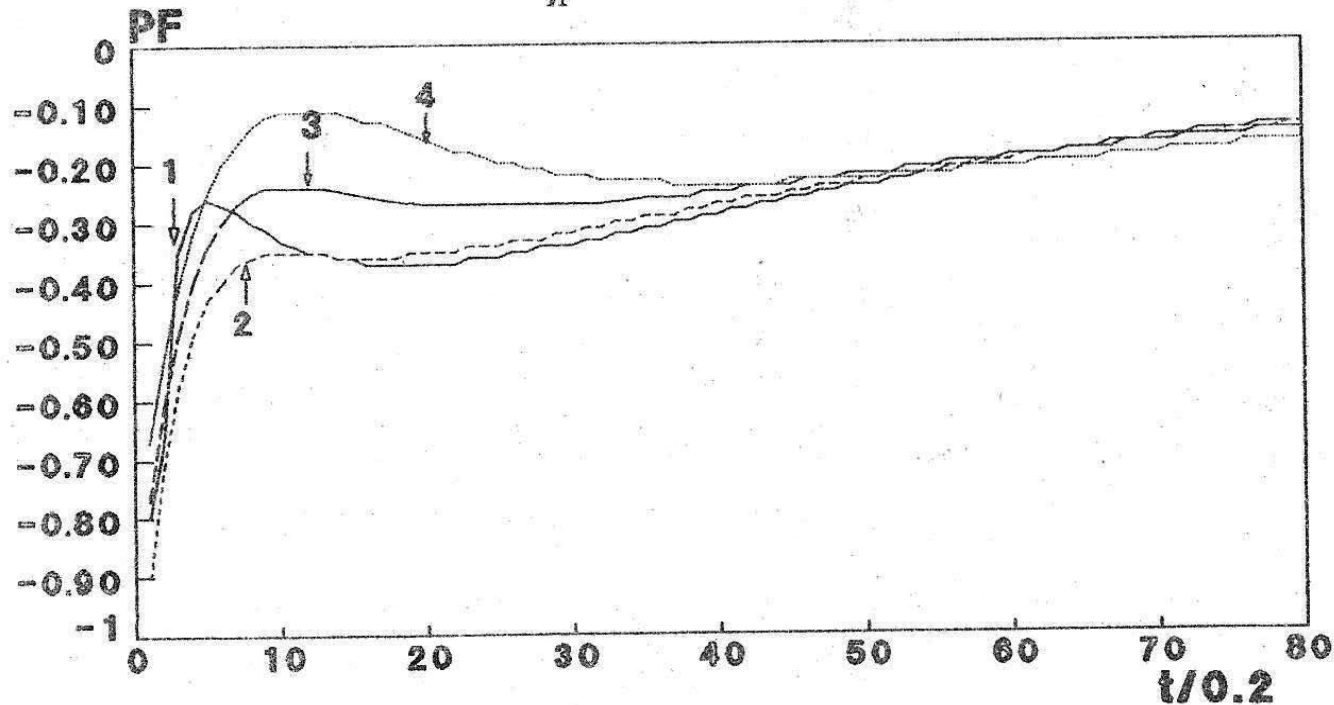


Рис. 4. Импульсная характеристика обратной связи в реакторе ИБР-2 для мощности 2,0 МВт и расхода натрия через активную зону $90 \text{ м}^3/\text{час}$ (кривая 1) и для мощности 0,8 МВт и расходов 90, 70, $50 \text{ м}^3/\text{час}$ (соответственно кривые 2, 3 и 4);

PF - в единицах $\beta_{И}/\text{МДж}$, время t - в сек.

	$\gamma_i, \beta_{И}/\text{МВт}$	$1/\lambda_i, \text{сек}$	$\gamma_i, \beta_{И}/\text{МВт}$	$1/\lambda_i, \text{сек}$
1	-9	10.8	-8.3	13.2
2	1.43	1.9	1	1.5
3	-0.44	0.25	-0.45	0.2
$\sum_1^3 \gamma_i = -8 \beta_{И}/\text{МВт}$			$\sum_1^3 \gamma_i = -7.75 \beta_{И}/\text{МВт}$	

В табл.7 представлены параметры мощностной обратной связи реактора ИБР-2, измеренные после перегрузки активной зоны и непосредственно перед перегрузкой на номинальной мощности. Видно, что замена имитатора в ячейке №3 тепловыделяющей сборкой не привела к существенным изменениям динамических характеристик МКР (в пределах ошибки измерений асимптотические значения мощностного коэффициента до и после перегрузки совпадают). На рис.7 приведены функции отклика реактора до и после перегрузки активной зоны.

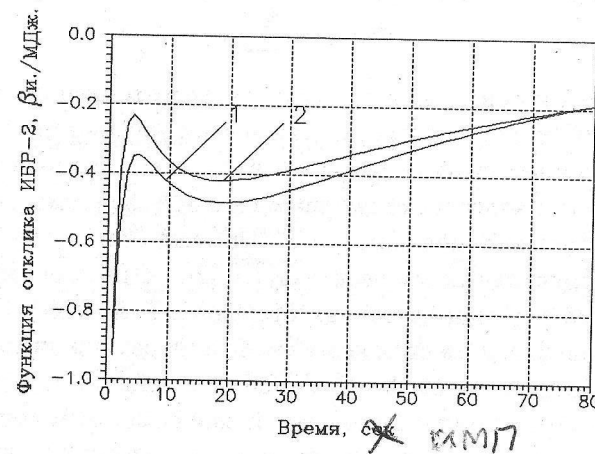
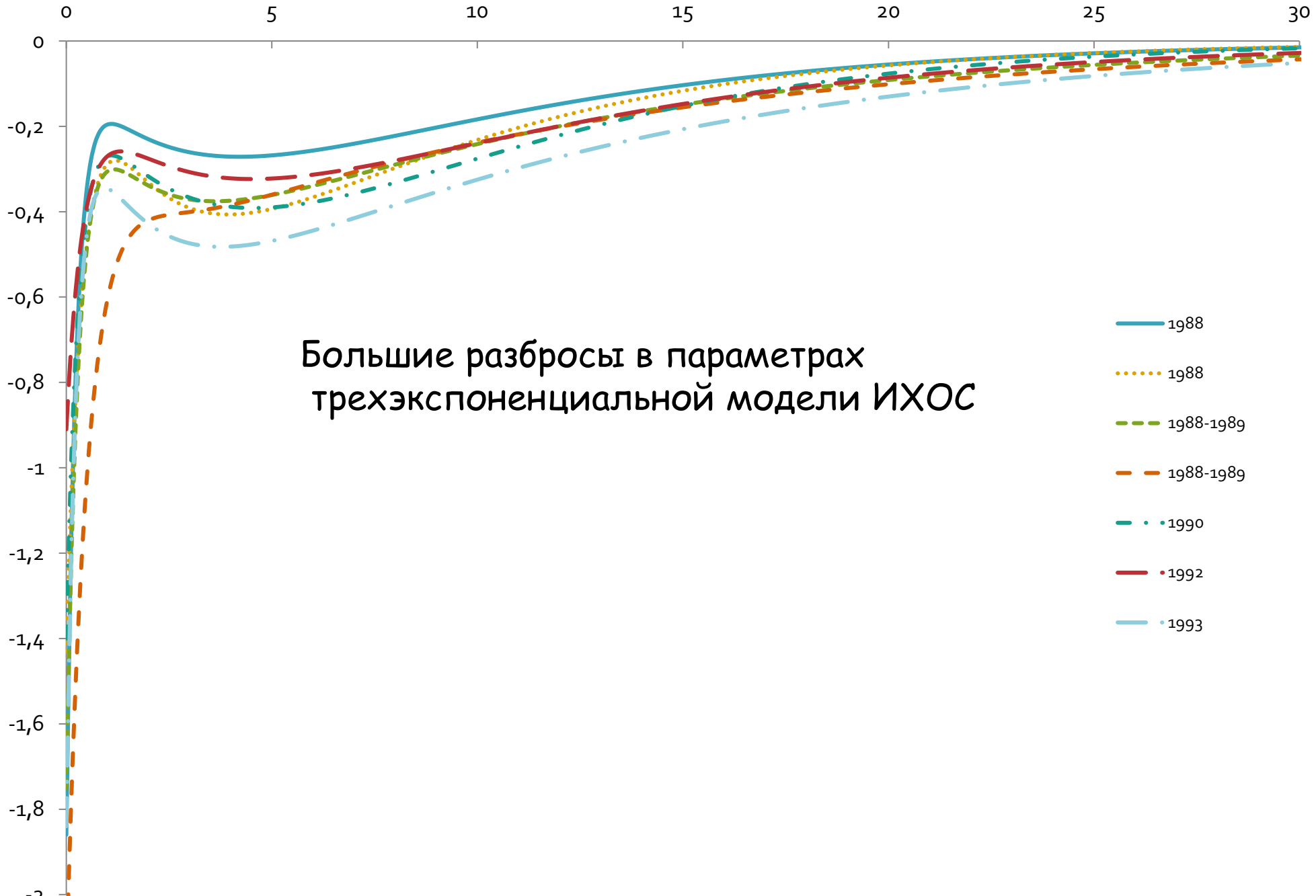


Рис.7 Импульсная характеристика обратной связи в реакторе ИБР-2.
1 - до перегрузки активной зоны в 1993 г., уровень средней мощности 2020 кВт.
2 - после перегрузки, уровень средней мощности 1950 кВт.

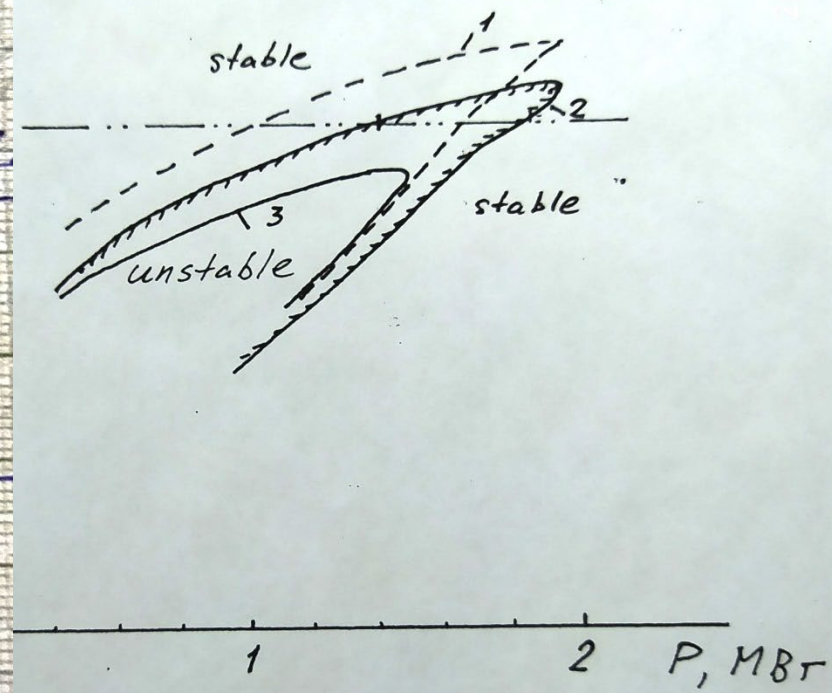
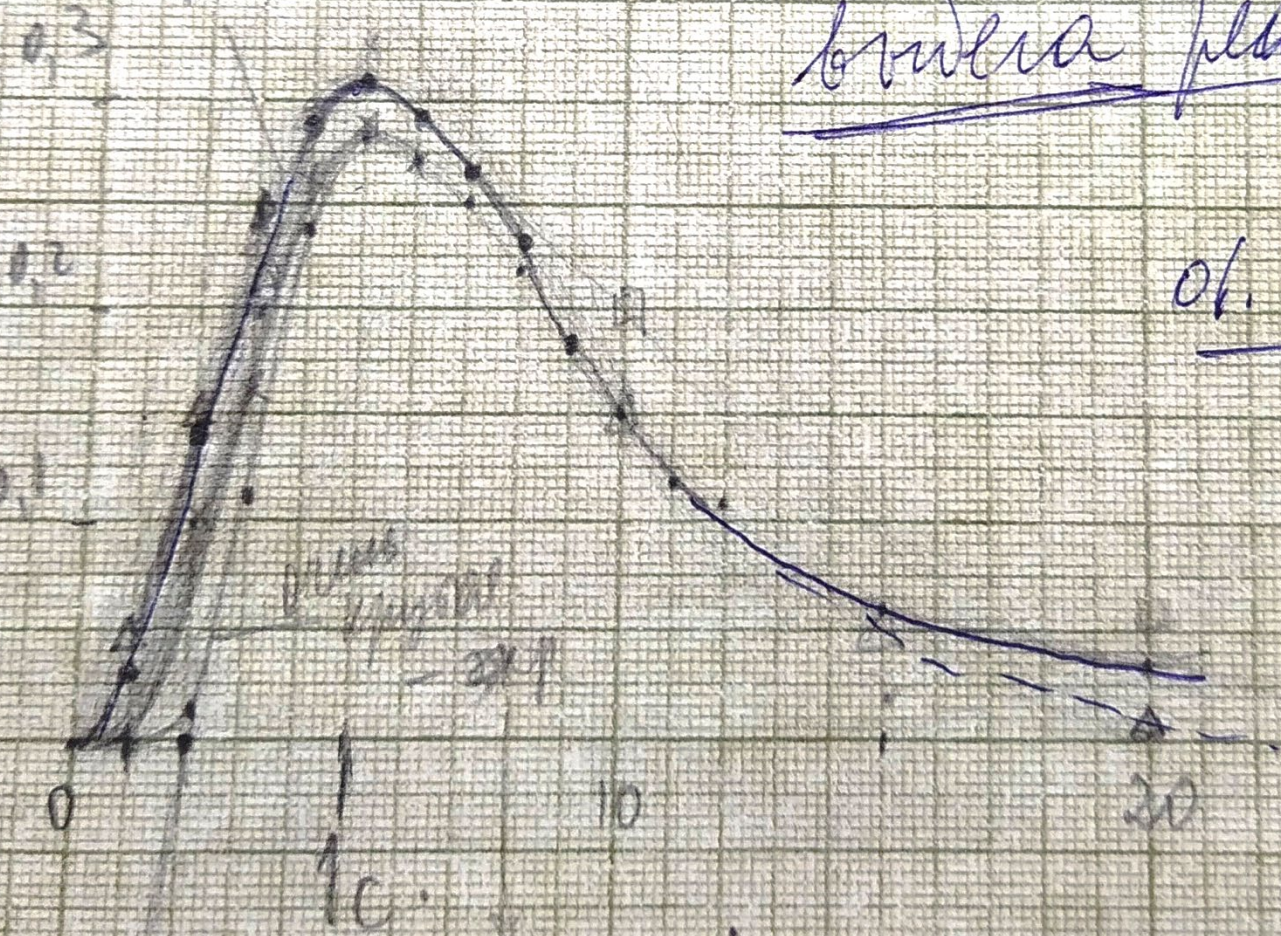


Самая первая попытка вычислить из экспериментов положительную компоненту (не опубликовано)

χ^2
наша ac

к вопросу описания
вибрационного режима

01. 1989г.



ory instability domains of the IBR-2 reactor, as they were deduced erialised three-component model of the feedback, modified by mited function on the second, positive component, after the ital data by the year 1993; curves 1, 2 and 3 correspond to the lues of the second component 1.1, 1.0, and 0.9, respectively.

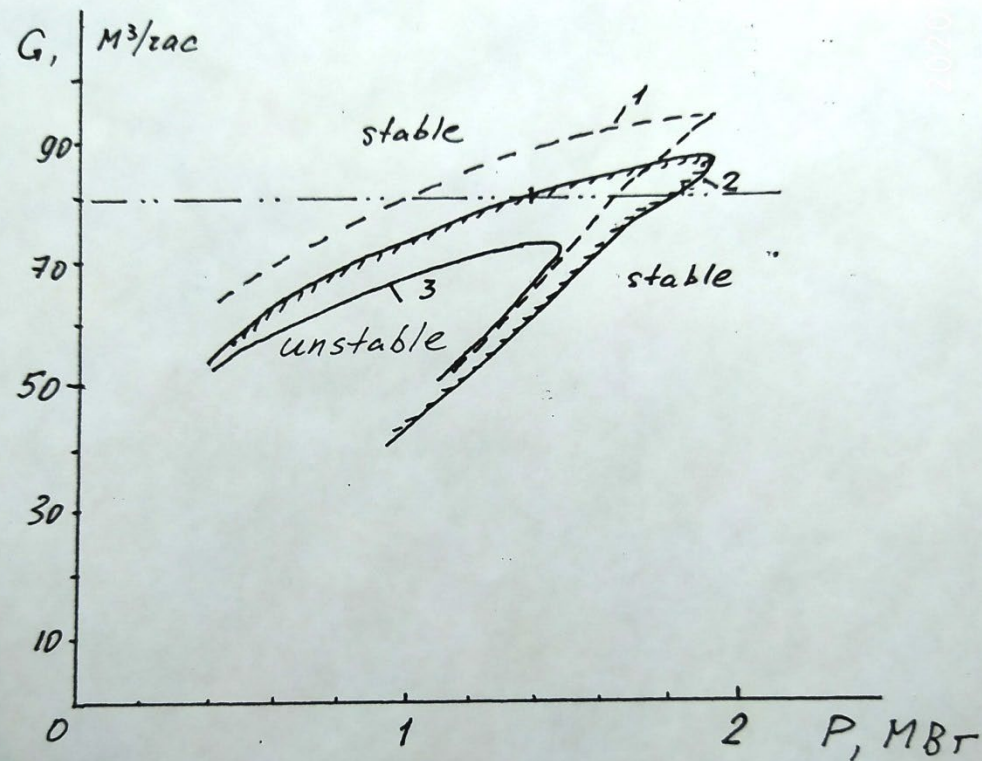


Fig.2. The oscillatory instability domains of the IBR-2 reactor, as they were deduced by the generalised three-component model of the feedback, modified by putting a limited function on the second, positive component, after the experimental data by the year 1993; curves 1, 2 and 3 correspond to the relative values of the second component 1.1, 1.0, and 0.9, respectively.

Области стабильности и нестабильности ИБР-2, вычисленные по трехэкспоненциальной модели обратных связей, при разной величине положительной компоненты; область нестабильности имеет границы и справа, и слева.

(неопубликованный отчет 1998 г)

Было предварительно изучено **7 физических причин** нестационарной реакции на возмущение

(компоненты обратной связи). Это:

1. Нагрев таблеток топлива (двуокись плутония) в твэлах за импульс и последующее охлаждение - отрицательный эффект $\sim 1 \beta$
2. Изгиб оболочек ТВС - положительный эффект $< 1 \beta$
3. Смещение активной зоны относительно органов регулирования (за счет нагрева столба таблеток и других конструкций) - отрицательный эффект $< 0.13 \beta$.
4. Изгиб оболочек твэлов ТВС - знак зависит от мощности, при 2-МВт скорее всего положительный, но мал.
5. Гидростатический (гидродинамический?) эффект из-за нагрева натрия в пространстве между ТВС (смещение ТВС) - положительный, сила 1 Н? .
6. Нагрев натрия (теплосъем с оболочек и от гамма-лучей) отрицательный $< - 0.02 \beta$
7. Эффект Доплера - скорее положительный, порядка 0.01β

Суммарный эффект (кроме 1 и 2) - отрицательный и менее 0.15β (по модулю).

. Сначала учитывали только первые два эффекта. (Эффект №5 требует внимания)

К расчету 1-ой компоненты ИХОС – нагрев твэлов (аксиальное расширение).

Основное приближение при оценке реактивности - её линейная связь с температурой:

$$\Delta \rho_i = - \alpha \cdot \Delta T_i \cdot \rho_i \cdot (1-\delta) \quad \text{- для } i\text{-го элемента .}$$

ΔT_i – среднее изменение температуры элемента i

ρ_i – реактивность, вносимая элементом i в кэфф

α – коэффициент линейного расширения

δ – отношение реактивности ед. длины элемента на краю зоны к средней по длине, $\delta \approx 0.4$.

Вычисление по одному среднему твэлу ($i=1$) завышает эффекты реактивности!

Пояснение:

Имеем два массива чисел: нагрев i -го твэла (или ТВС) и реактивность его же (вклад в $k_{эфф}$)

T_i и ρ_i

Произведение средних значений всегда больше

среднего значения произведения чисел массивов одного индекса:

$$\overline{T_i} \times \overline{\rho_i} > \overline{T_i \times \rho_i}$$

Для ИБР-2М коэффициент $\overline{T\rho}/(\overline{T_i} \times \overline{\rho_i}) \approx 0.74$

Изменение реактивности нагрева твэла на момент окончания импульса (амплитуда ИХОС)

От i -того твэла (ТВС):

$$\Delta k_i = - \frac{\alpha \Delta T_m^i R_m^i}{y_0} \cdot L \cdot \int_0^{y_0} dy \cdot \cos^3 y \cdot \left(1 - \frac{R(y_0)}{R(y)} \right) ; \quad y_0 / \sin y_0 = k_z = 1.26$$

α - коэффициент линейного расширения PuO_2 ,

ΔT_m^i и R_m^i - нагрев за импульс и удельная реактивность в максимуме на оси твэла; L - длина твэла;

$R(y)$ -- удельная реактивность на координате y от центра.

$y_0 = 1.15$ - приведенная координата, соответствующая границе активной зоны по вертикале,

подчиняется уравнению $y_0 / \sin y_0 = k_z = 1.26$ – коэффициент неравномерности энерговыделения по длине твэла.

Для случая $R(y)/R_m = \cos^2 y$:

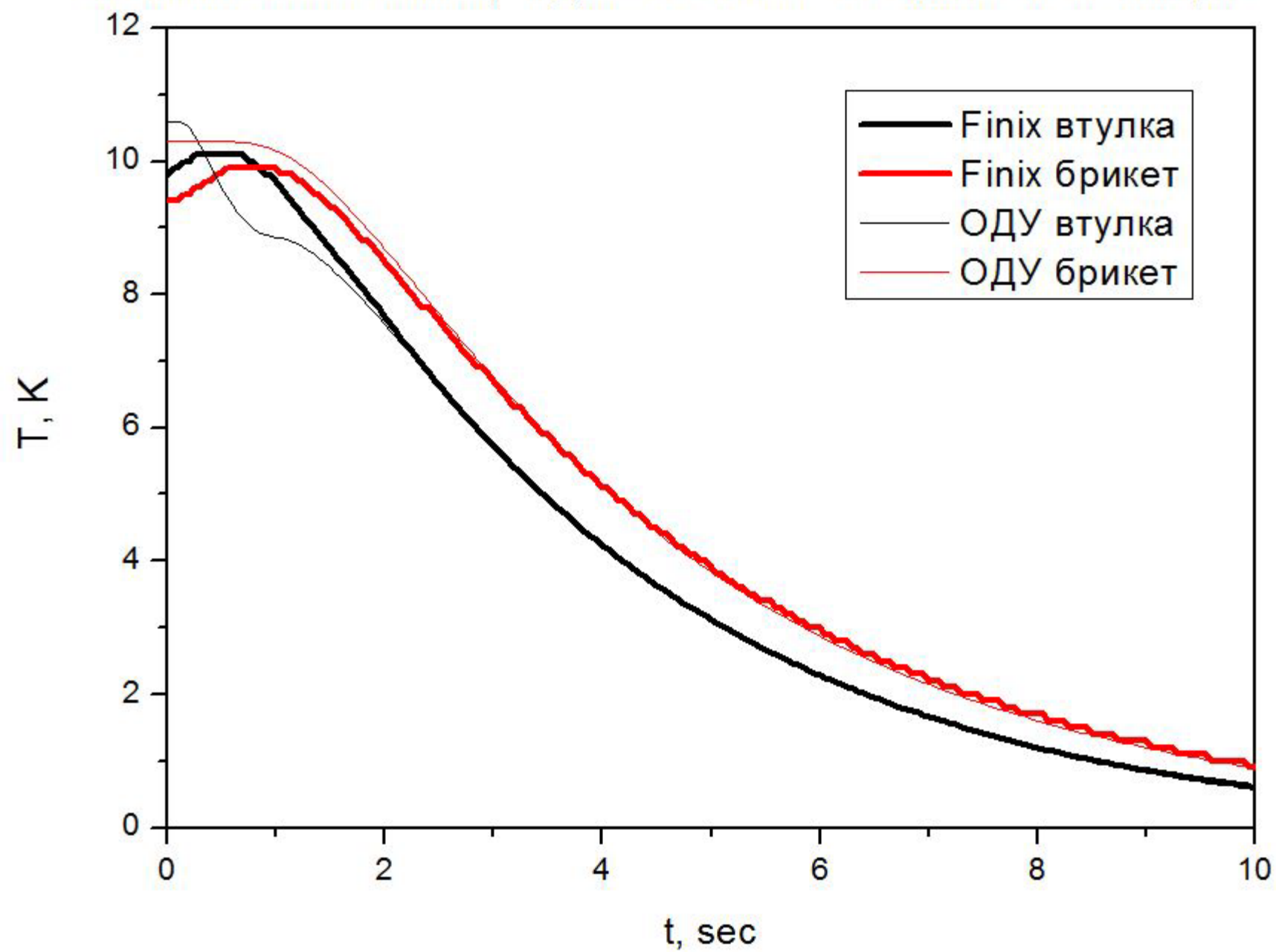
$$\Delta k_i = - 0.612 \alpha \cdot \bar{T}_i R_\Sigma^i$$

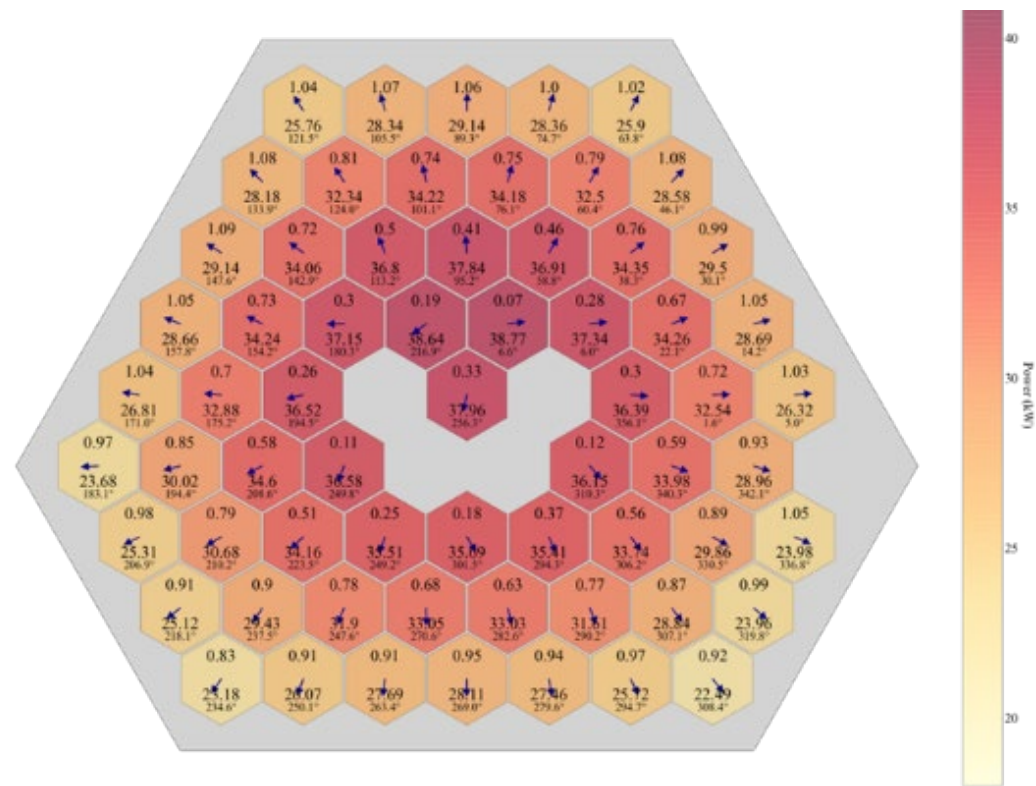
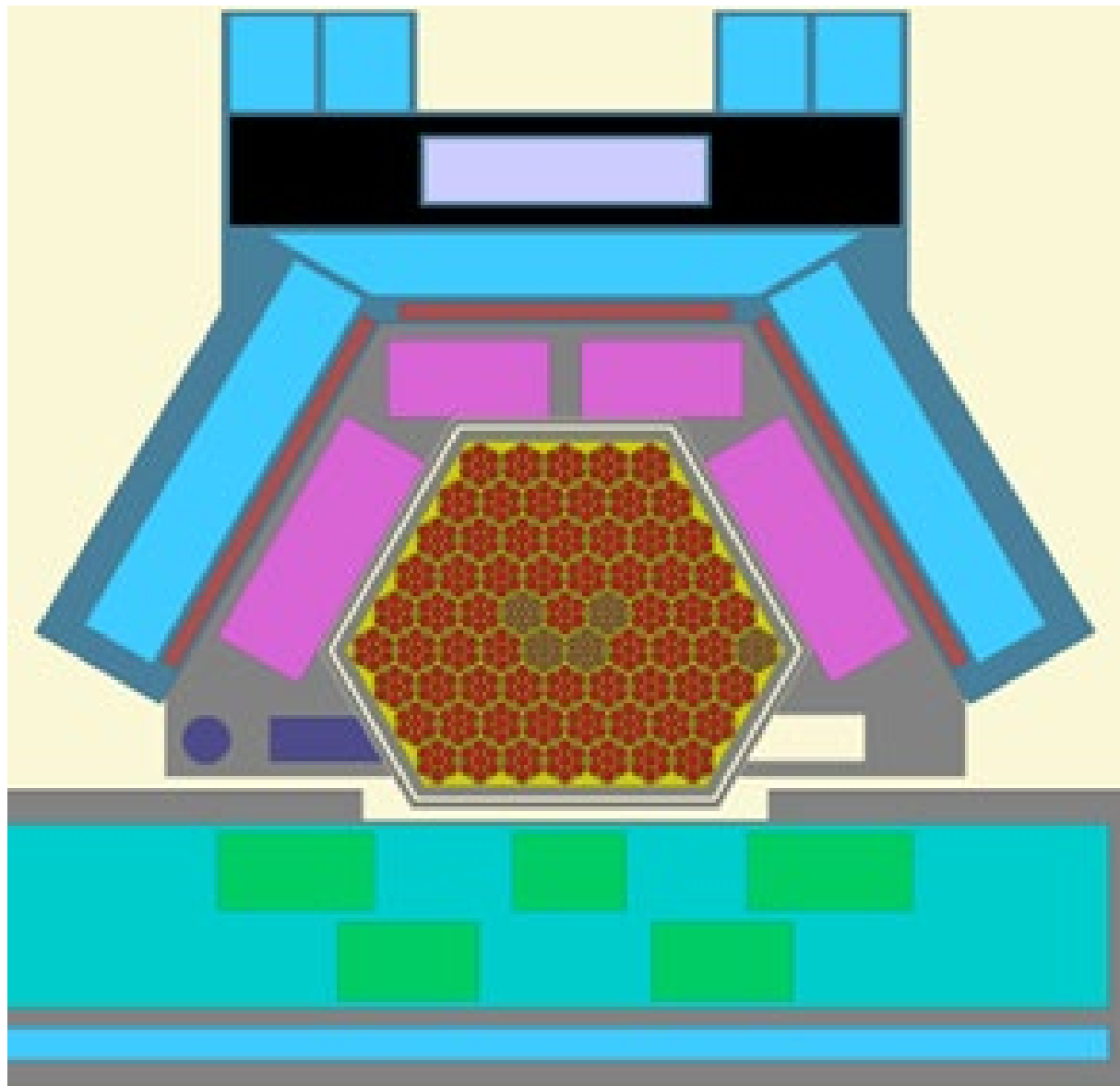
$$\Delta k = - 0.612 \alpha \sum_{i=1}^n \bar{T}_i R_\Sigma^i$$

\bar{T}_i - средний нагрев i -того элемента
 R_Σ^i - реактивность i -того элемента

Эти величины рассчитываются численно по программам Finix и Serpent

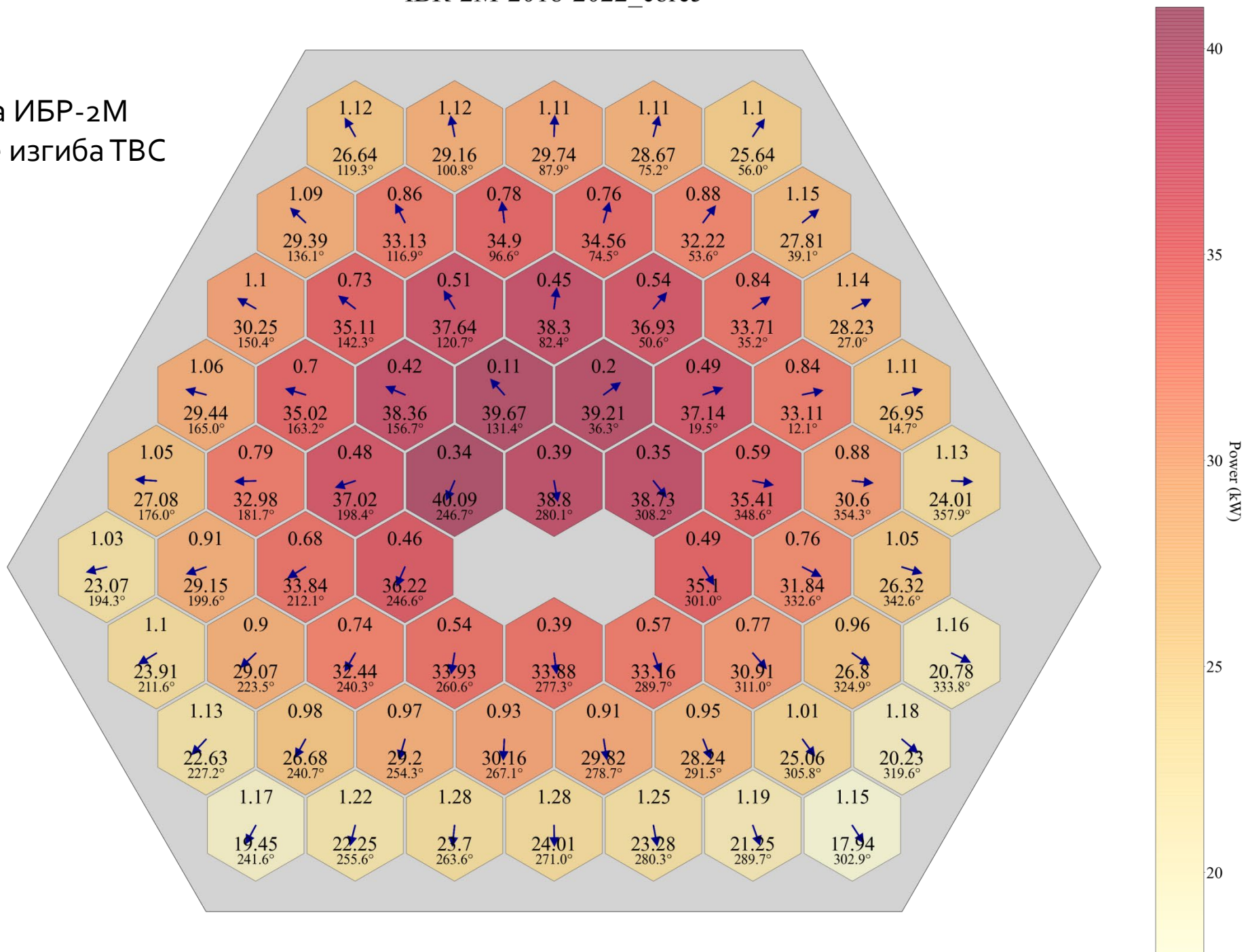
Максимальная температура в твэле после одиночного импульса



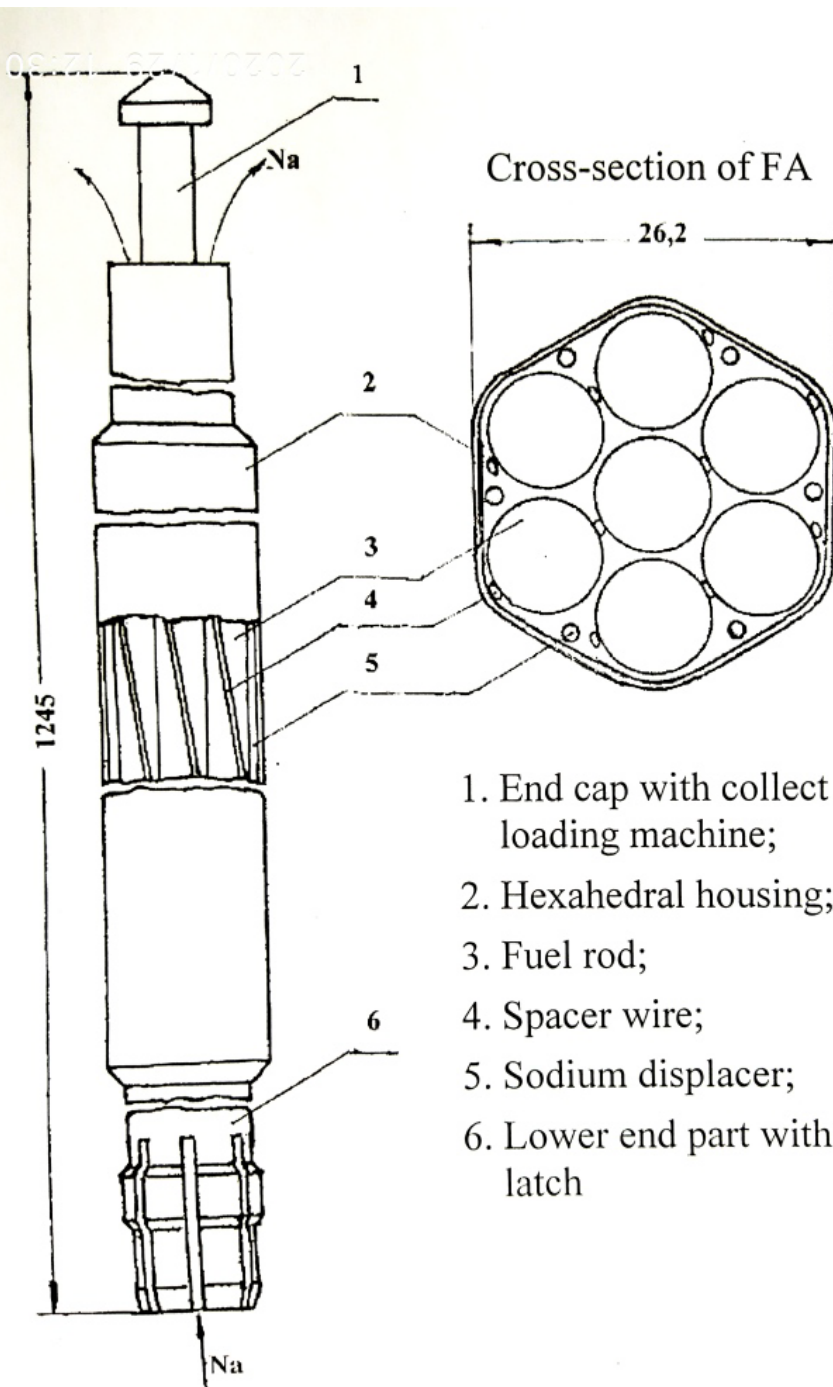


2 МВТ, 2011 г.

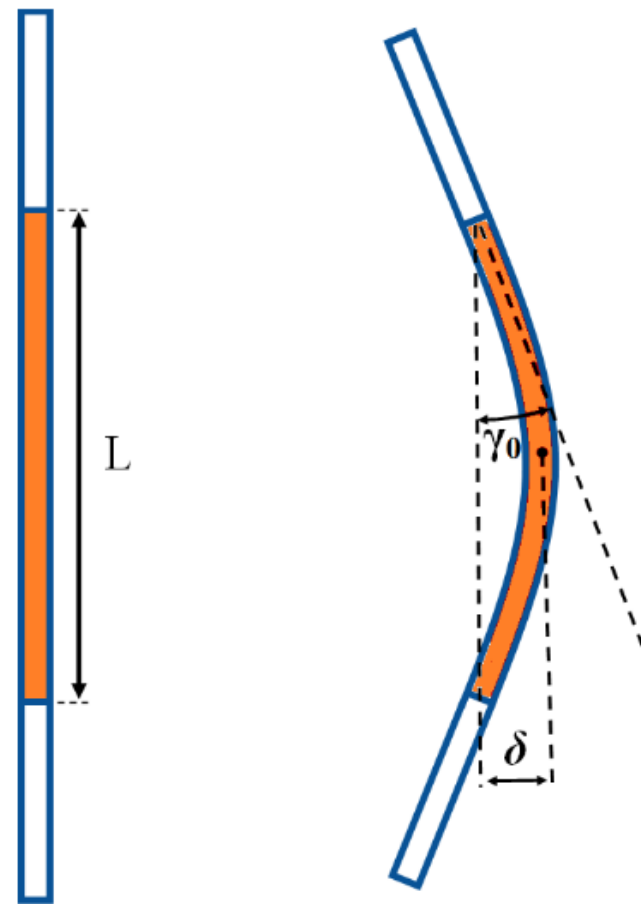
Компановка ИБР-2М
при расчете изгиба ТВС



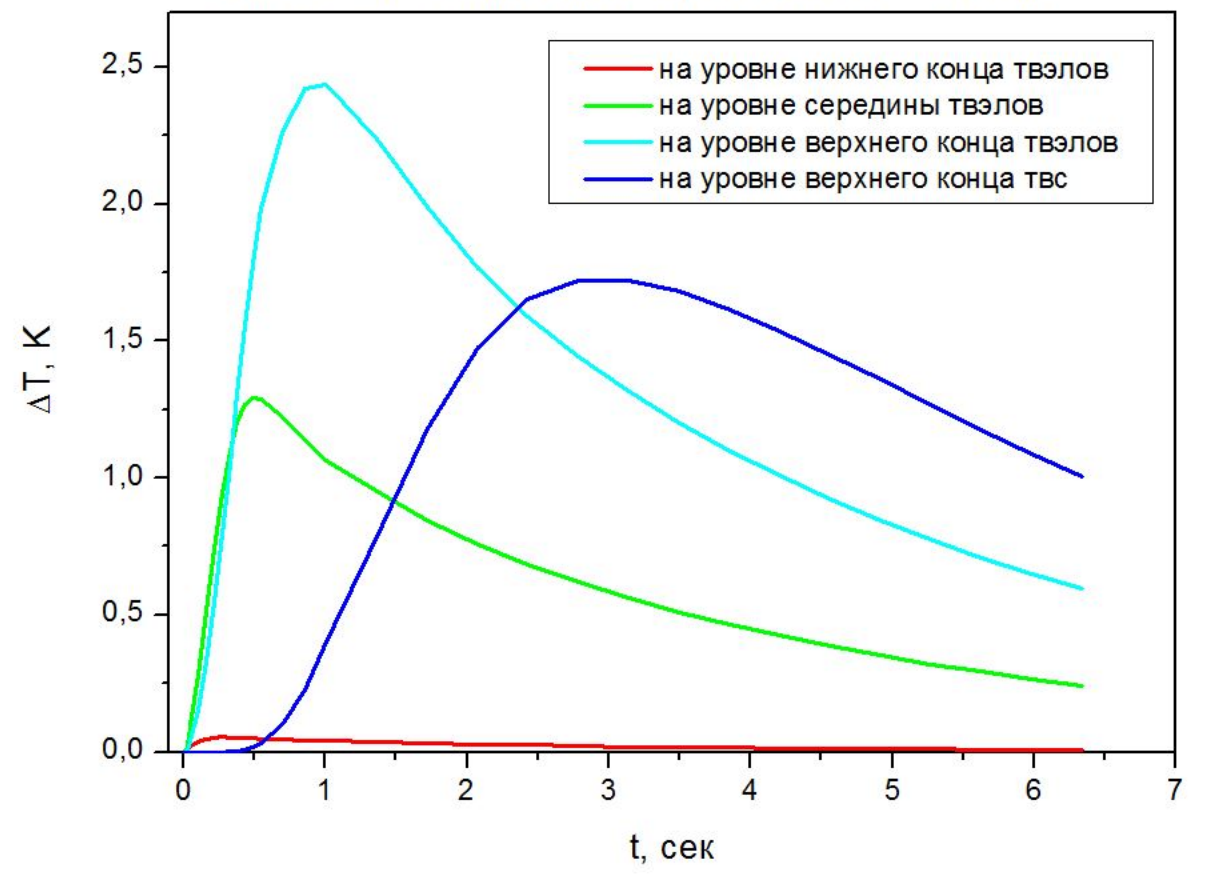
Концы ТВС
свободны в рамках
диапазона изгиба
(это сотые доли мм)



Отношение шага к диаметру
 $9.6/8.6 = 1.116$,
а для Нептун (НИКИЭТ)
 $17.7/17 = 1.041$

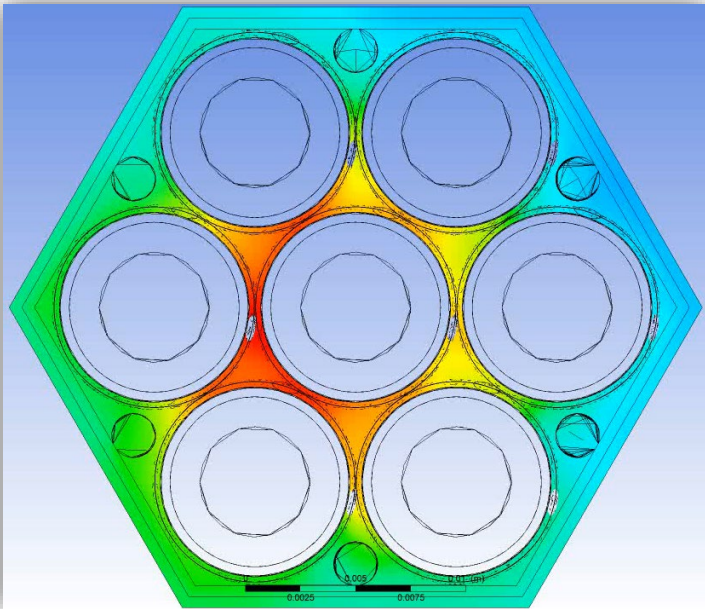


Изменение температуры стенки твс на разной высоте.
Одиночный импульс (подогрев топлива +13,3 К).

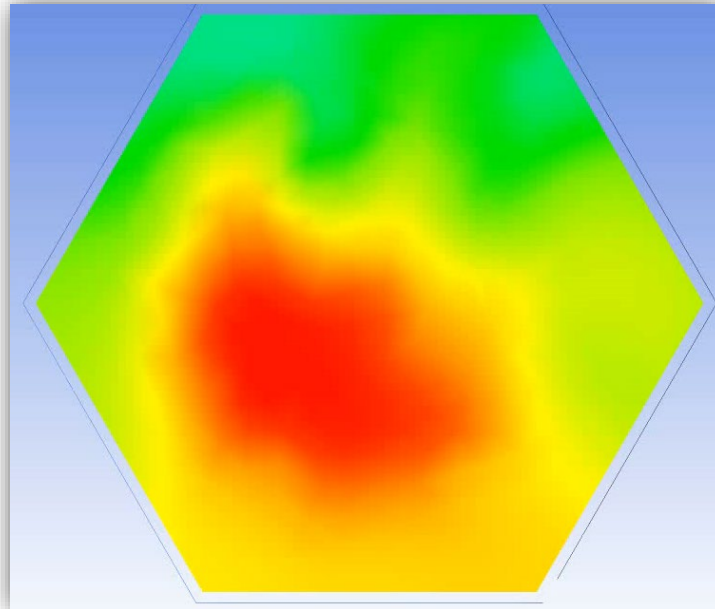


Распределение температуры натрия в сечении ТВС на разной длине его «пробега». Более горячая область смещается против часовой стрелки на $\sim 90^\circ$

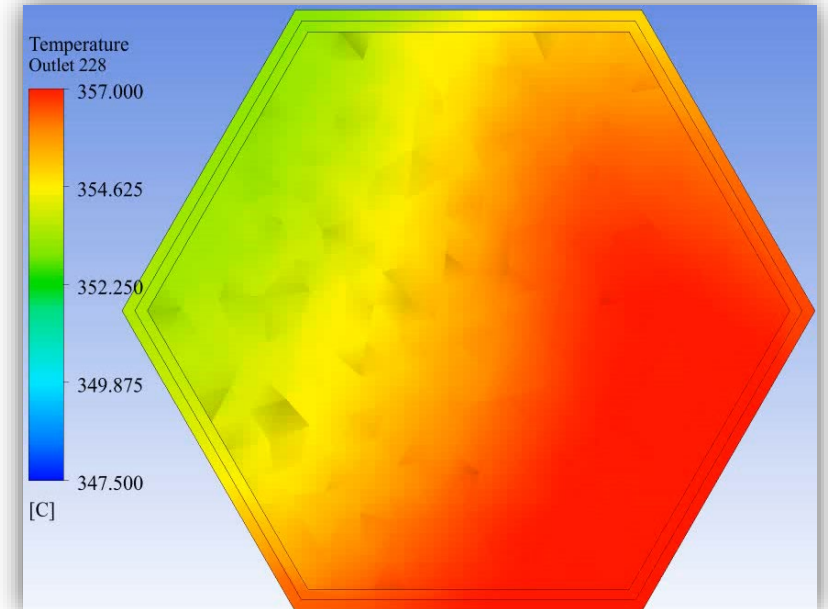
End of fuel pellets
 $Y=777$ mm



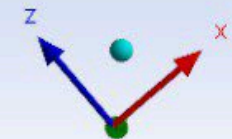
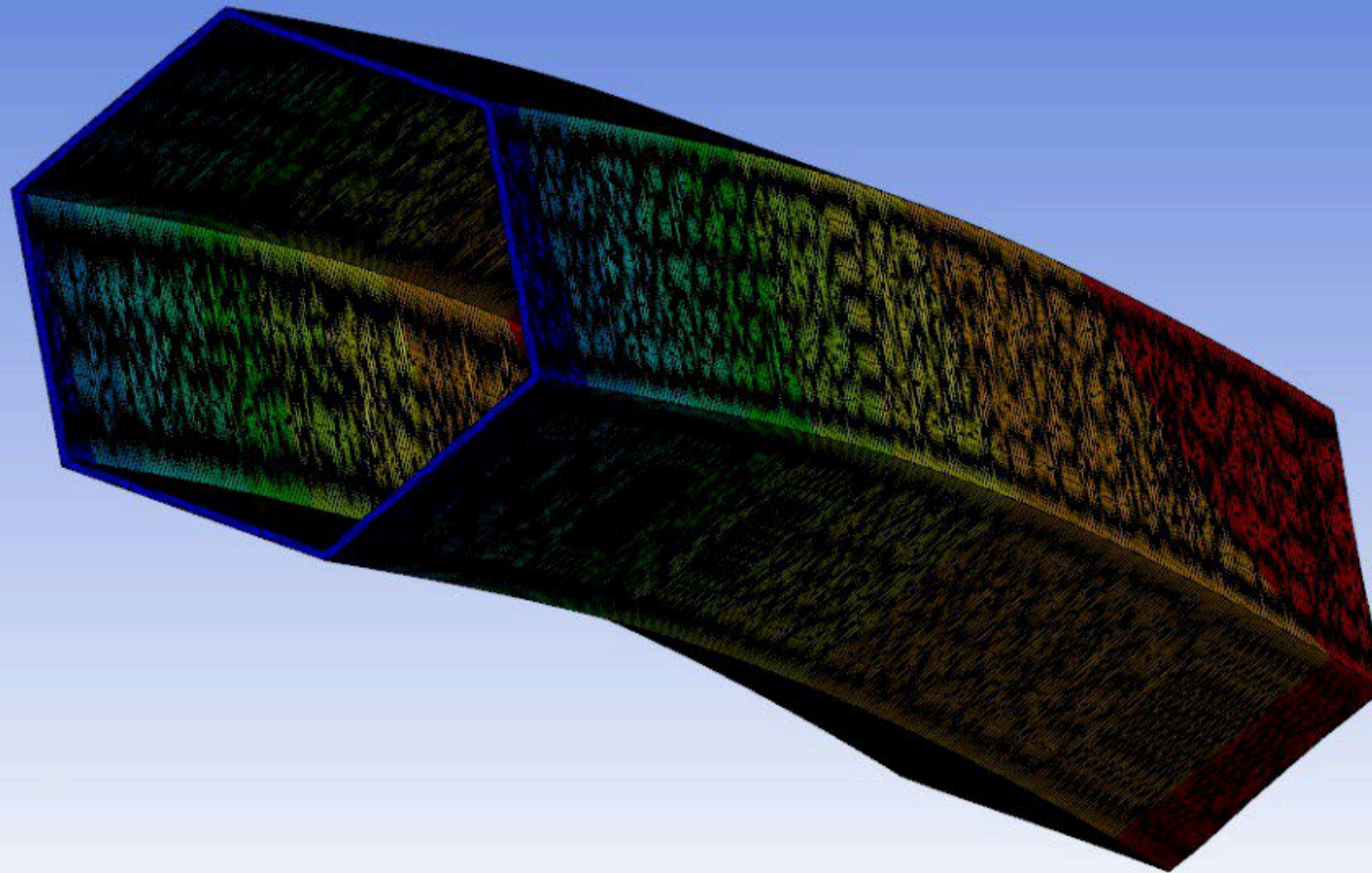
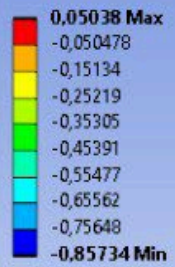
Fuel rod fastening
 $Y=1100$ mm



End of Fuel assembly
 $Y=1215$ mm



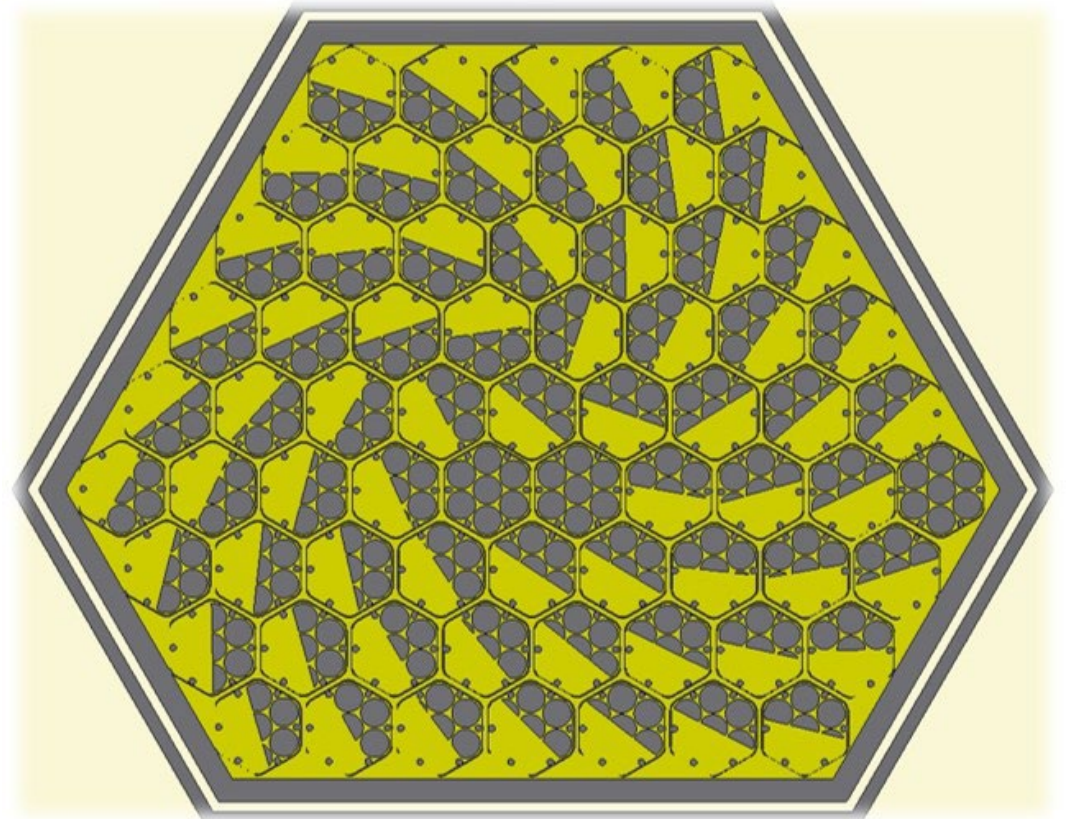
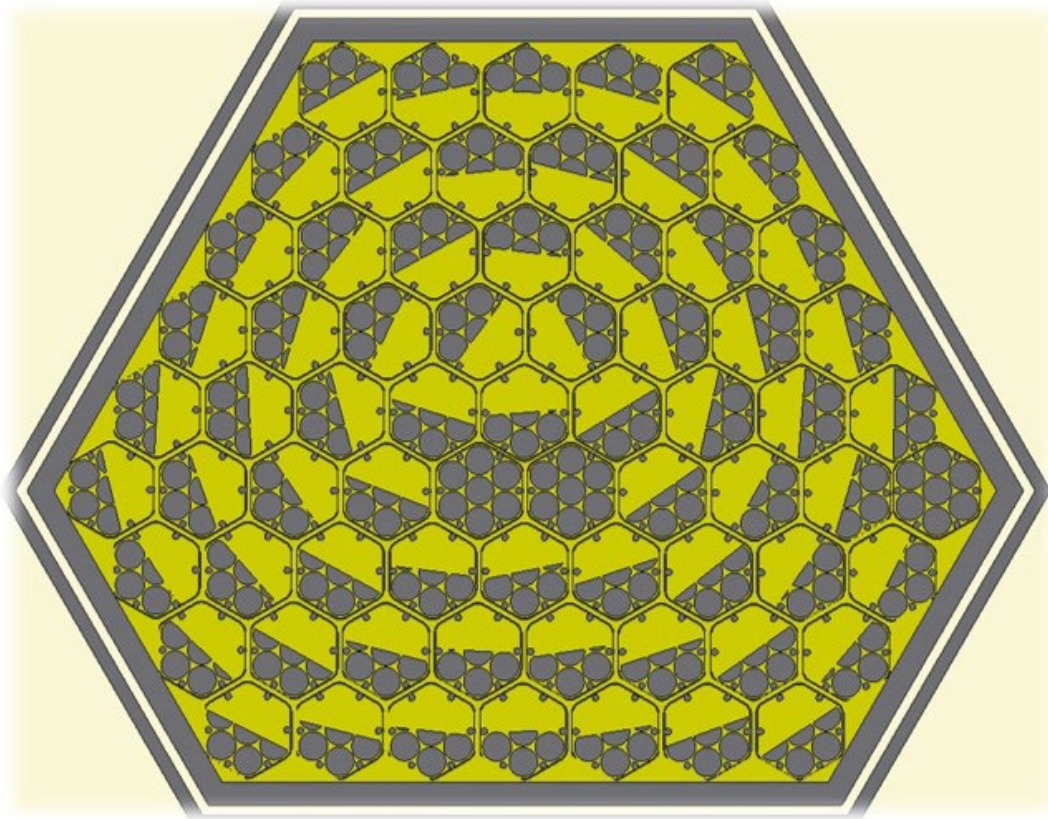
B: Static Structural
Directional Deformation Z
Type: Directional Deformation(Z Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 1
07.05.2024 10:02



Изгиб ТВС (смещение твэлов)

Предполагаемый – по градиенту энерговыделения

Действительный – по температуре стенок



На этом рисунке ошибка в раскраске – надо поменять местами «светлое» и «темное»!

Расчет (аналитический) изгиба ТВС ИБР-2М и соответствующего эффекта реактивности

Исходные данные:

- Энерговыведение в ТВС крайнего ряда – 28 кВт/ТВС (при 2 МВт)
- Размер оболочки ТВС $D = 26.2$ мм
- Длина твэла – $L = 78$ см
- Нагрев натрия, средний – 30 К/ МВт
- Изменение энерговыведение' на 27 мм – 21%
- Коэффициент неравномерности -1.4.
- Изменение реактивности при смещении на 1 мм ТВС 1 ряда 0.0038
 $\Delta k/k = 25 \beta$

Рассчитано:

Предполагаемая разность ΔT оболочки ТВС – 3.4 К/ МВт (точный расчет – 4 К)

Изменение реактивности при смещении на 1 мм ТВС 1 ряда + остальных рядов с учетом вклада в К: $> 46 \beta/\text{мм}$

Величина изгиба = $\alpha \Delta T L^2/8D = 0.019$ мм

Смещение нижнего конца твэла – $\sim 0.06-0.07$ мм

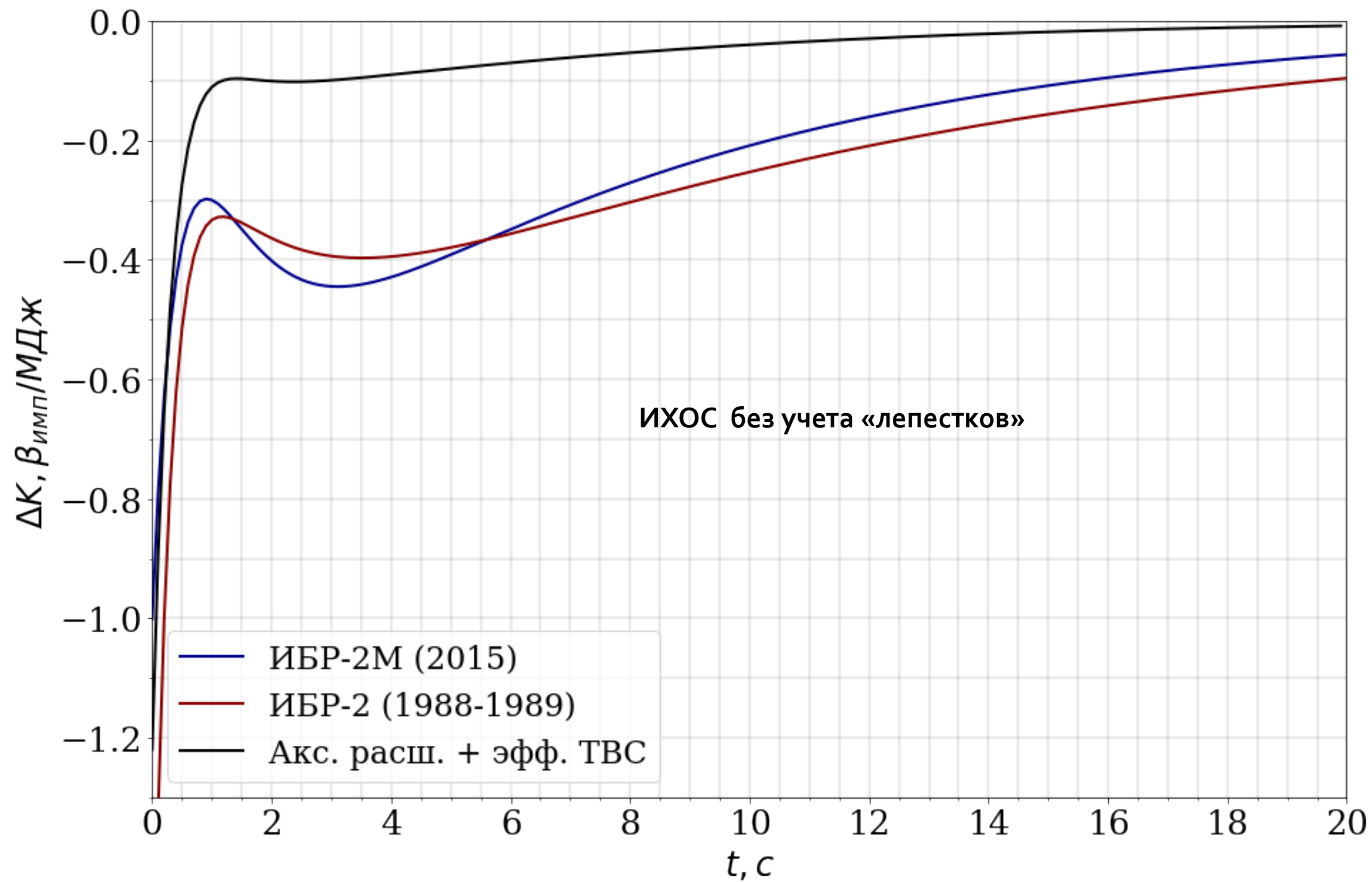
Среднее смещение активной части – ~ 0.05 мм /МВт,
эффект реактивности : **$+2.3 \beta/\text{МВт}$** , ($0.7 \beta/\text{К}$)

Экспериментальная (?) оценка эффекта при 1.5-2МВт : $\rho_+ = 2.2 \beta/\text{МВт}$

Уточненный (численный) расчет $+ 4 \beta/\text{МВт}$ (погрешность не определена)

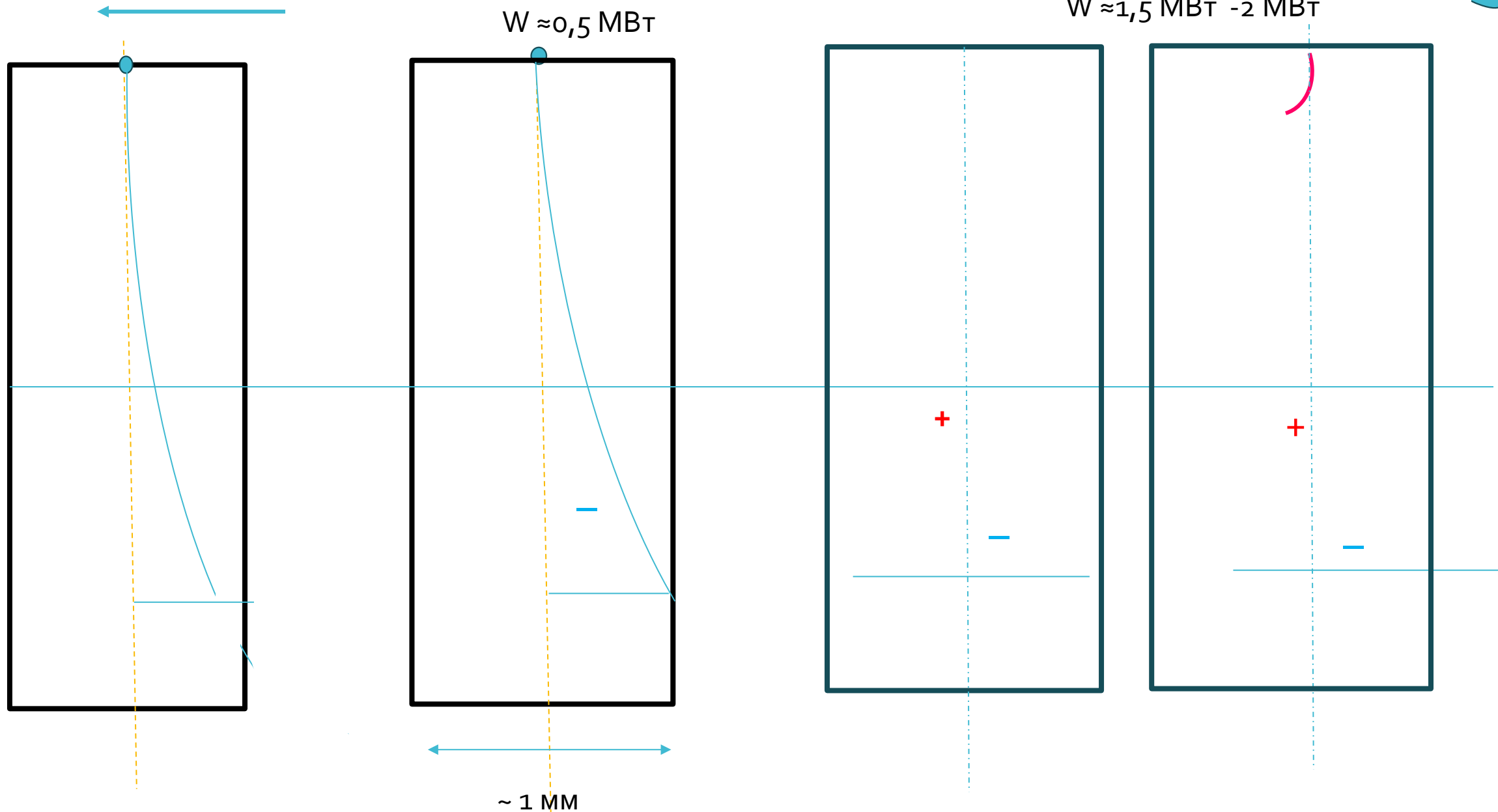
Учет изгиба твэлов , который при мощности $0.5-1$ МВт увеличивает реактивность, может изменить оценку эффекта.

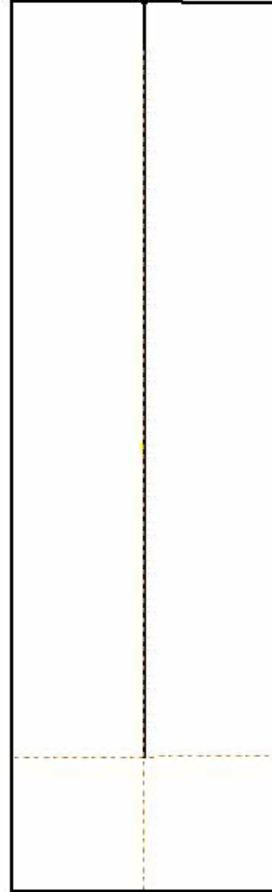
При заземлении нижнего концевика твэлов положительный эффект реактивности был бы примерно в 2 раза меньше, и неустойчивости не было бы. Так показывает расчет А. Верхоглядова



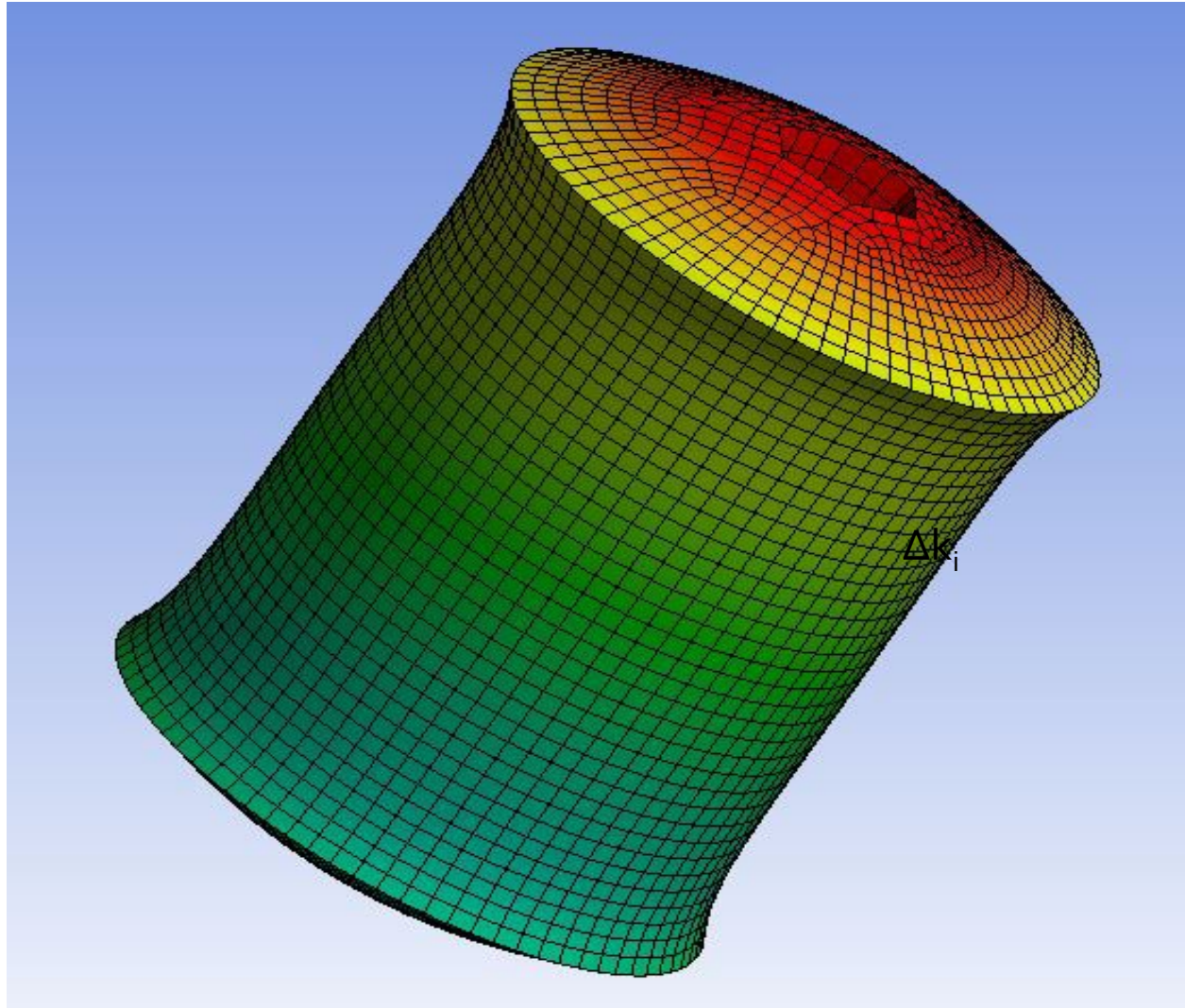
К центру а.з.

Демонстрация изменения знака эффекта изгиба твэлов внутри ТВС с мощностью



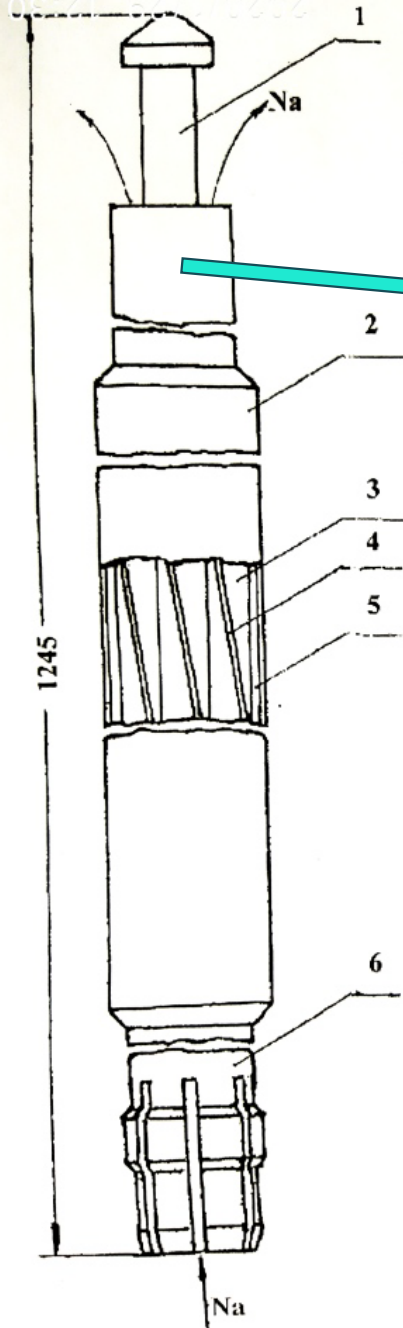


То же, что на предыдущем слайде , но мультипликация :
демонстрация изменения знака эффекта реактивности
вследствие изгиба твэлов
с отрицательного на положительный при росте мощности

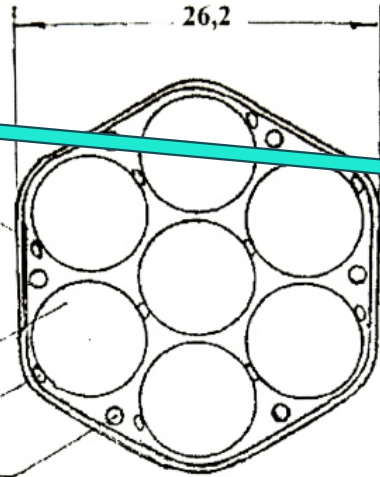


Форма топливной таблетки
после нагрева и быстрого
охлаждения

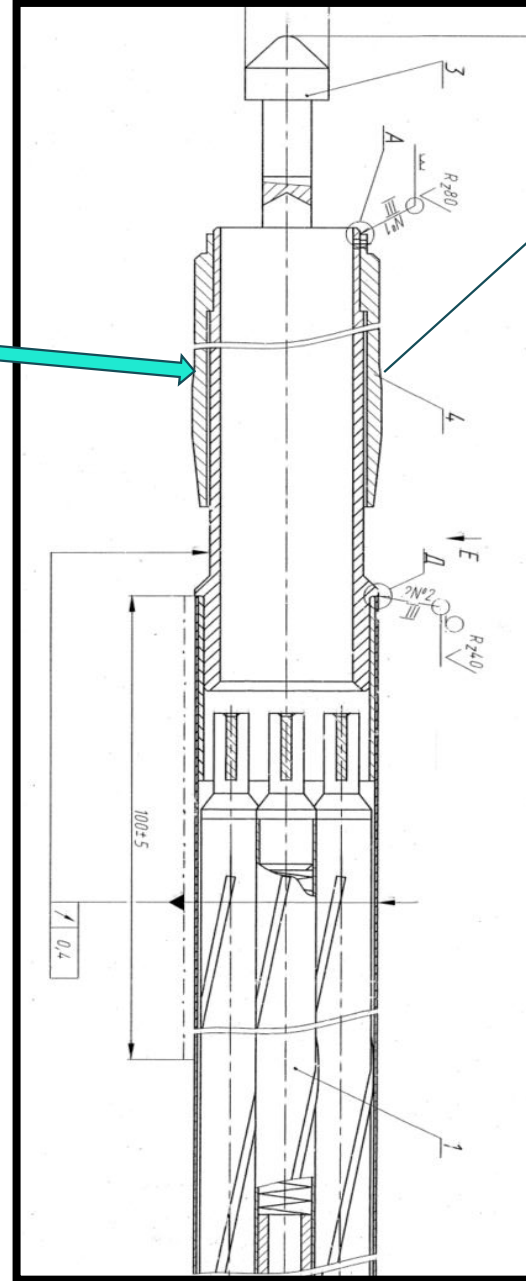
05:21 67:0707



Cross-section of FA

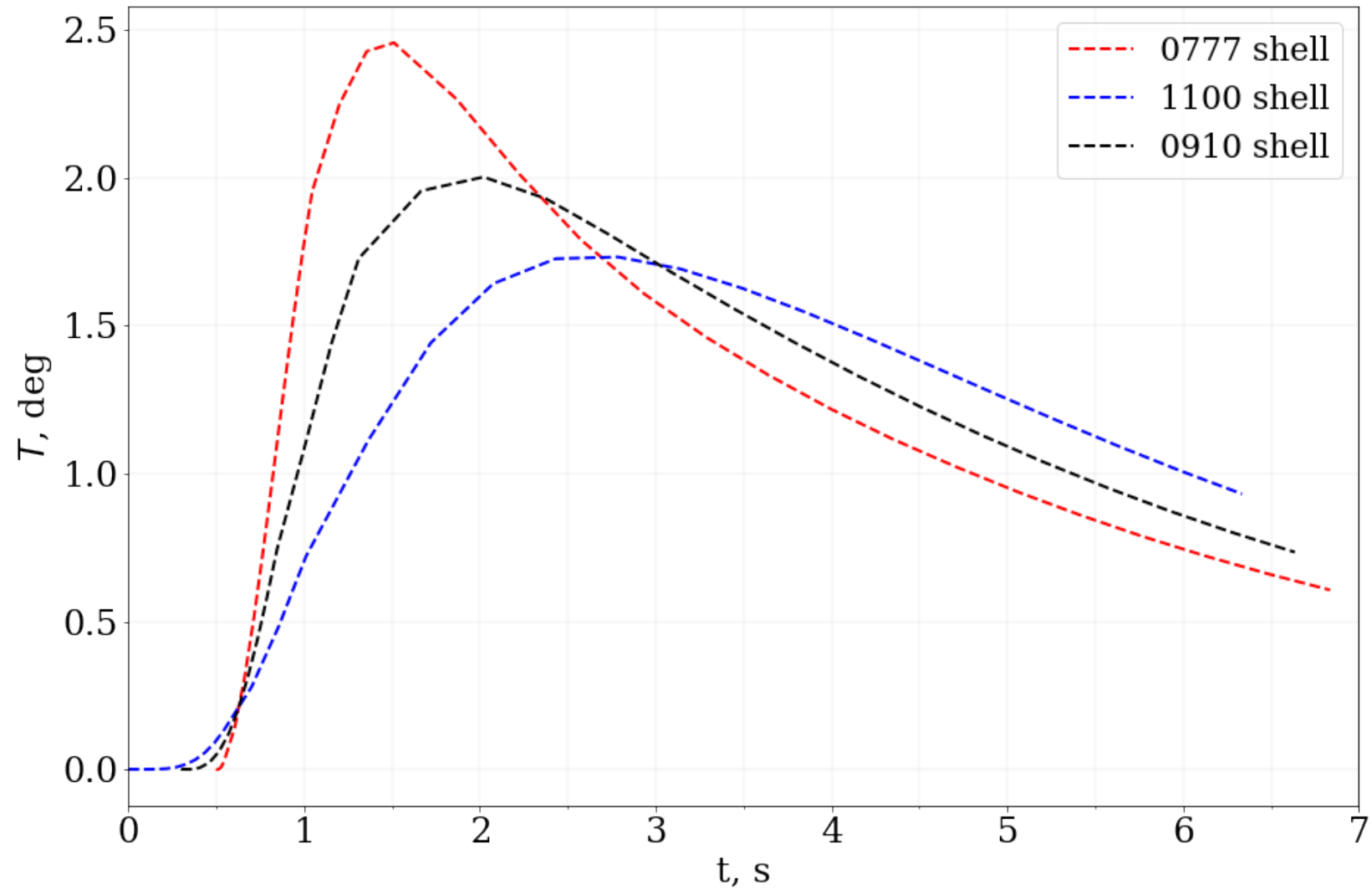


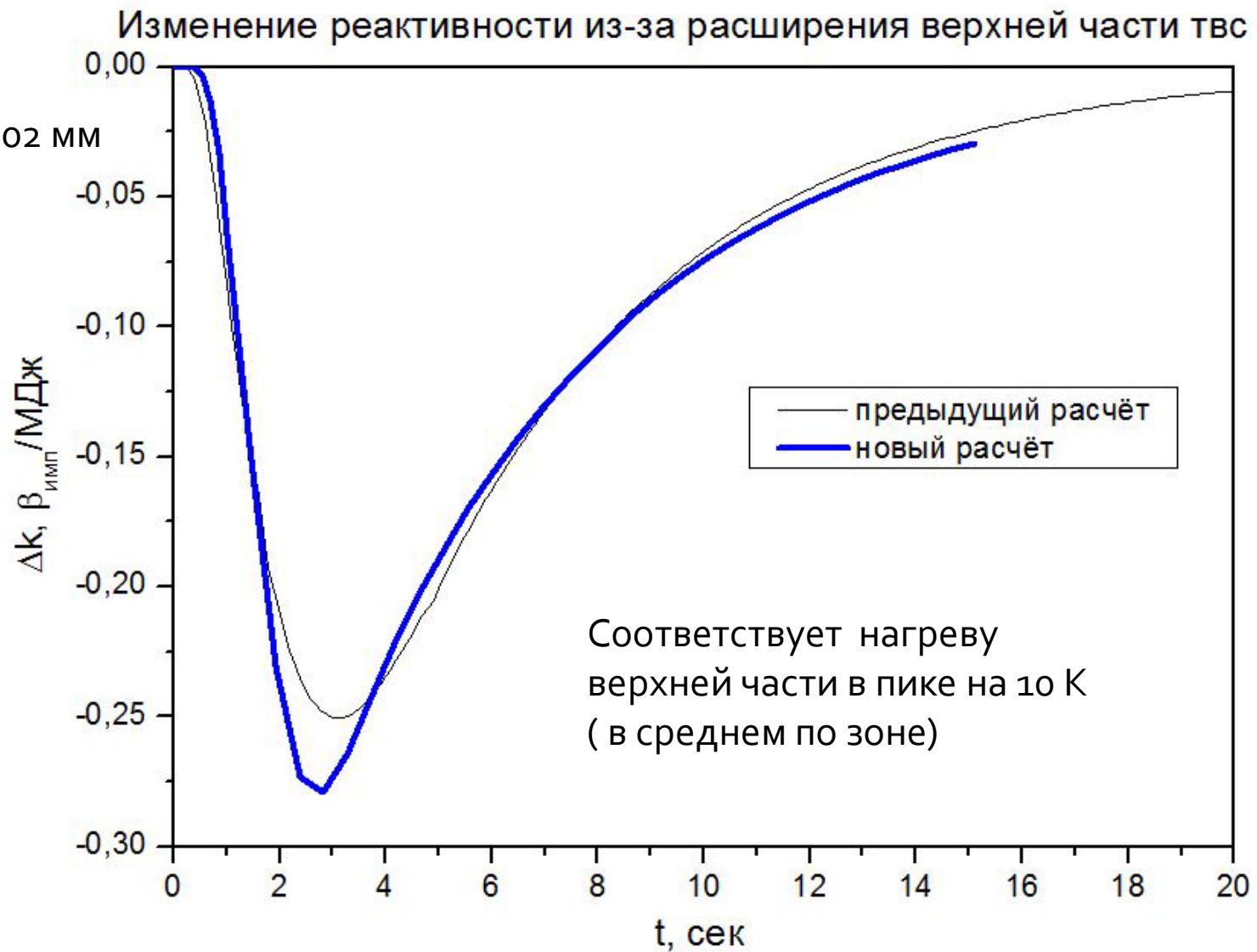
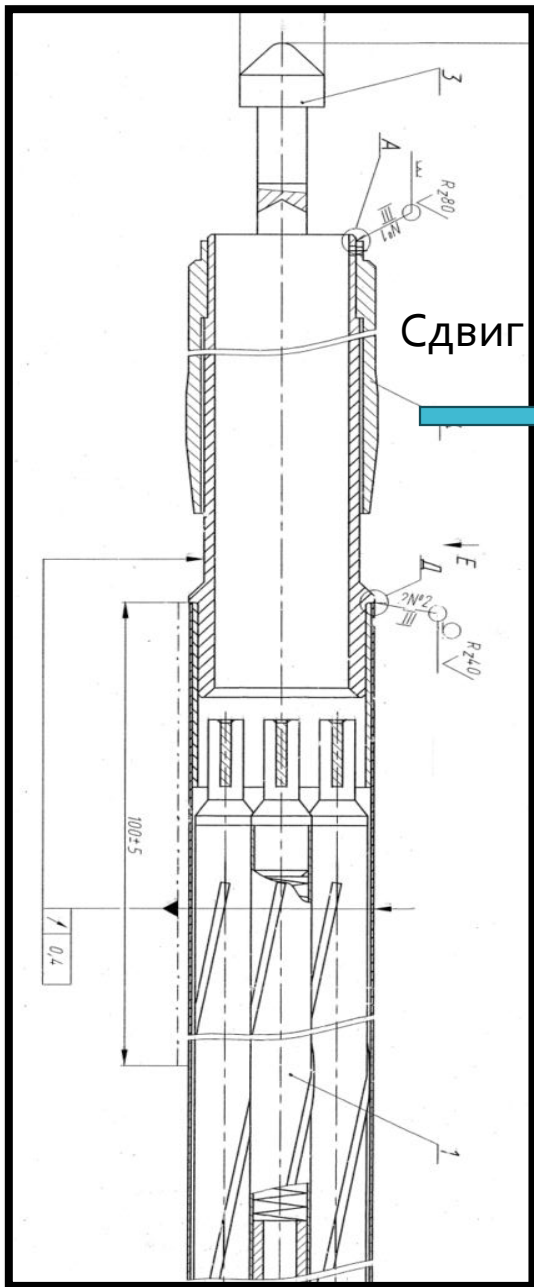
1. End cap with collect grip for the loading machine;
2. Hexahedral housing;
3. Fuel rod;
4. Spacer wire;
5. Sodium displacer;
6. Lower end part with a collet latch

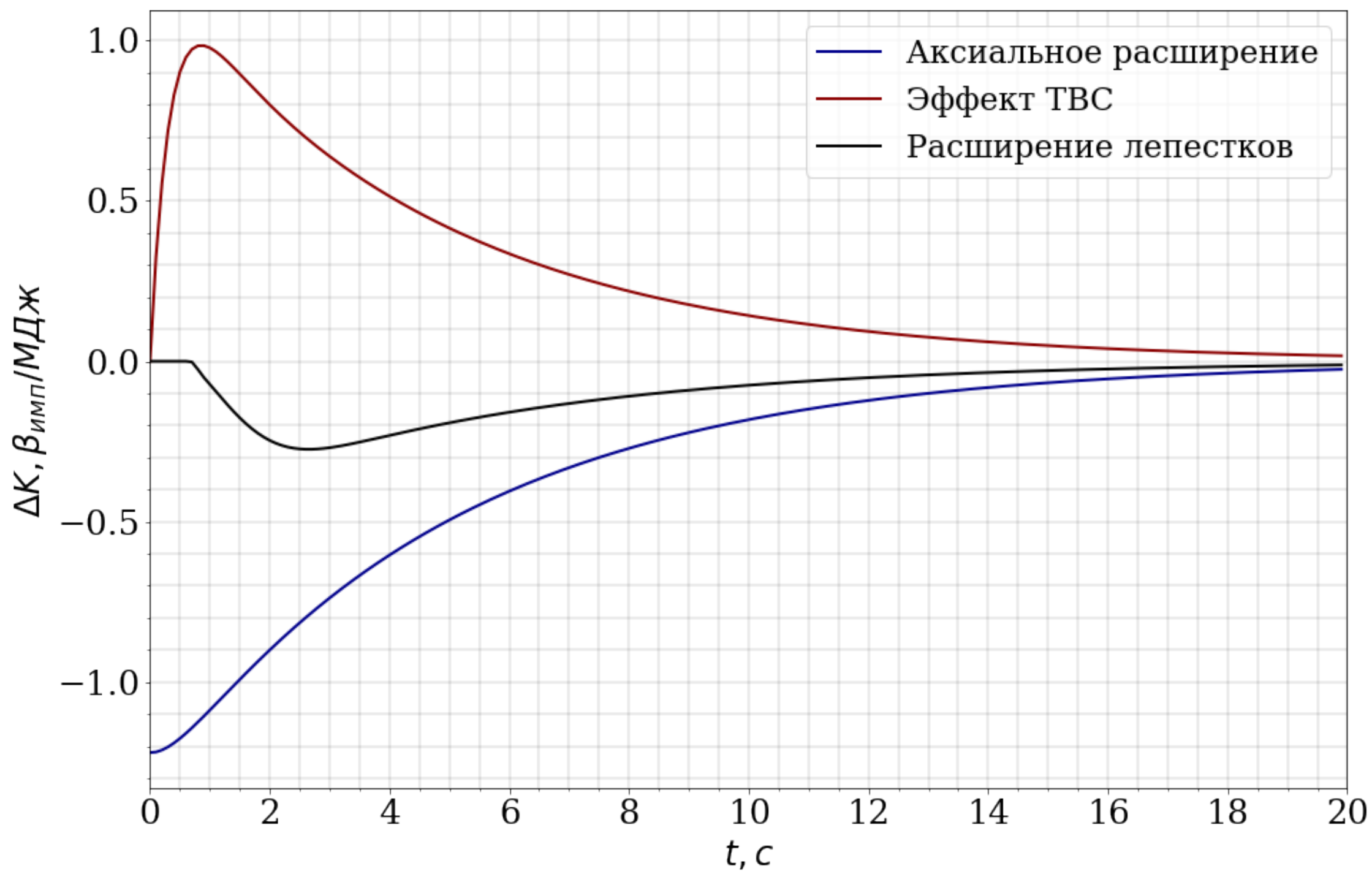


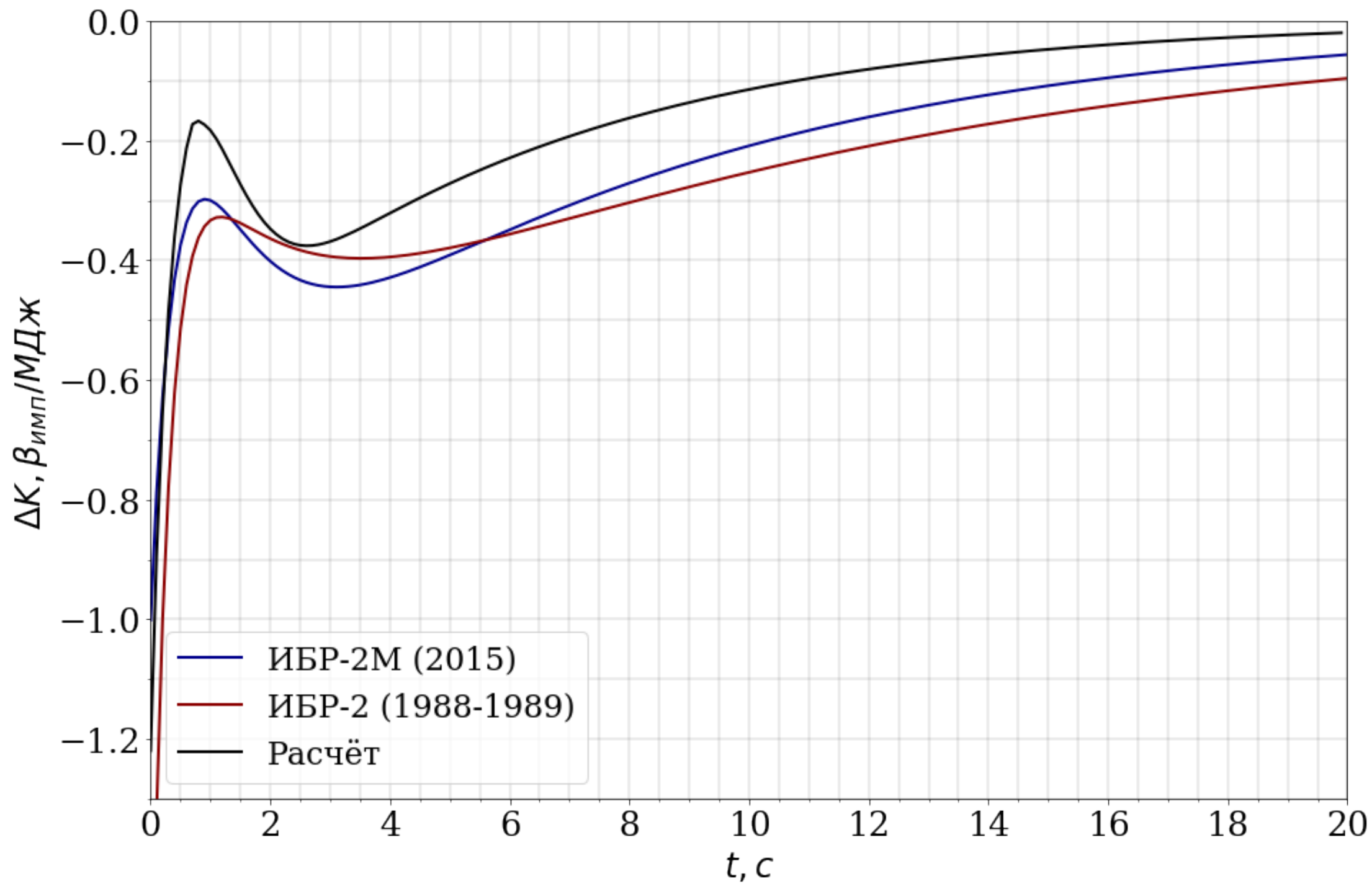
«Лепестки»
в верхней части ТВС,
6 штук

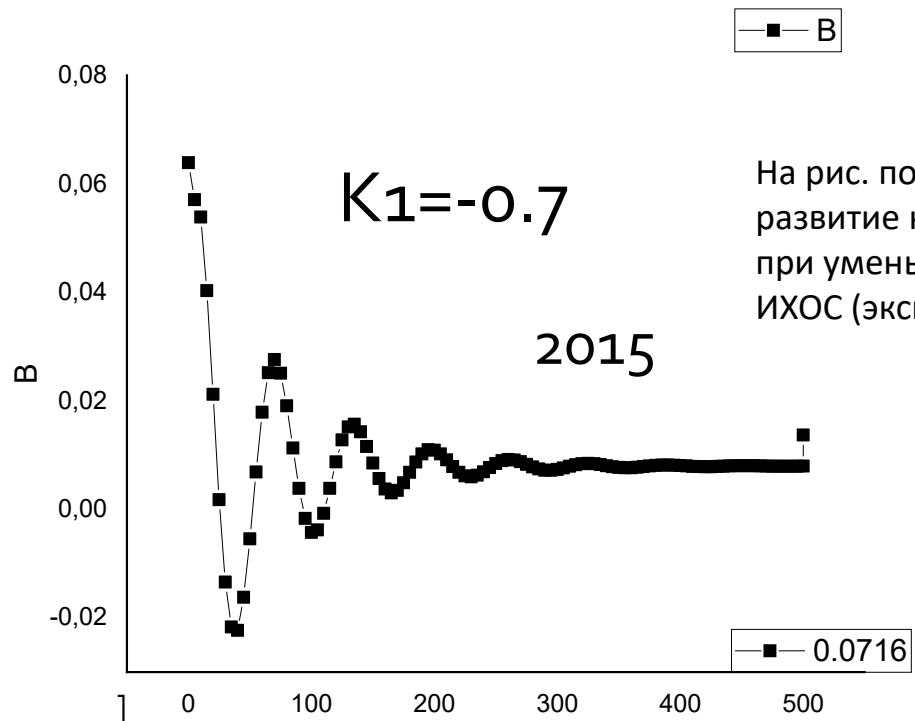
Временная зависимость нагрева стенок ТВС на разном расстоянии (мм) от входа



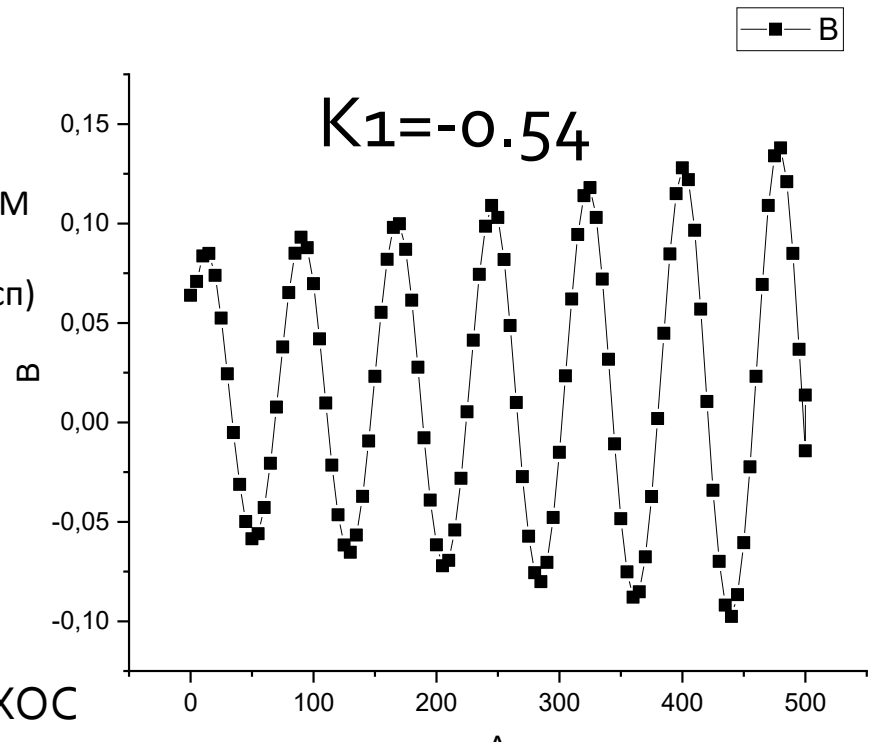
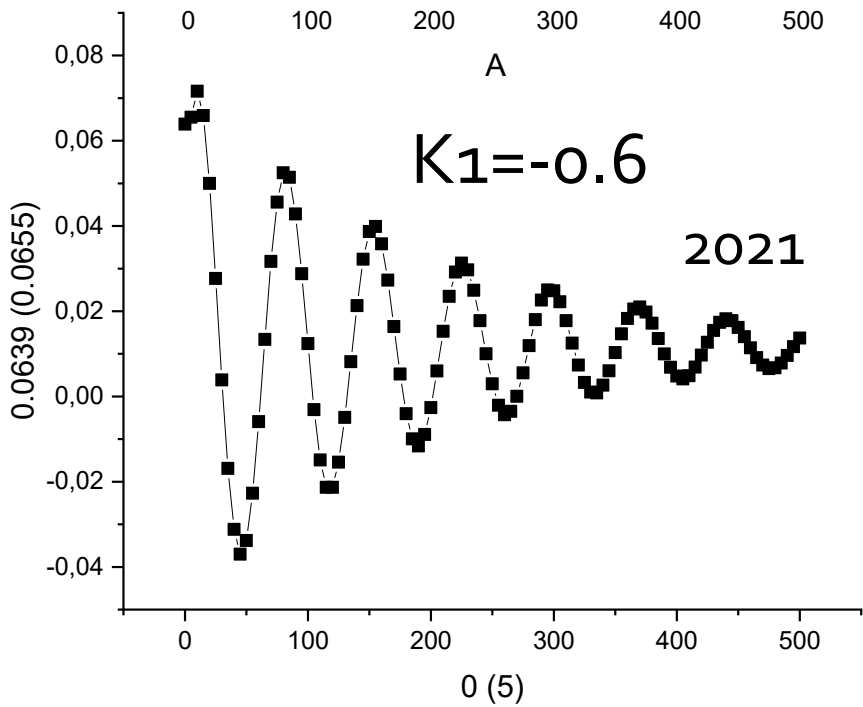






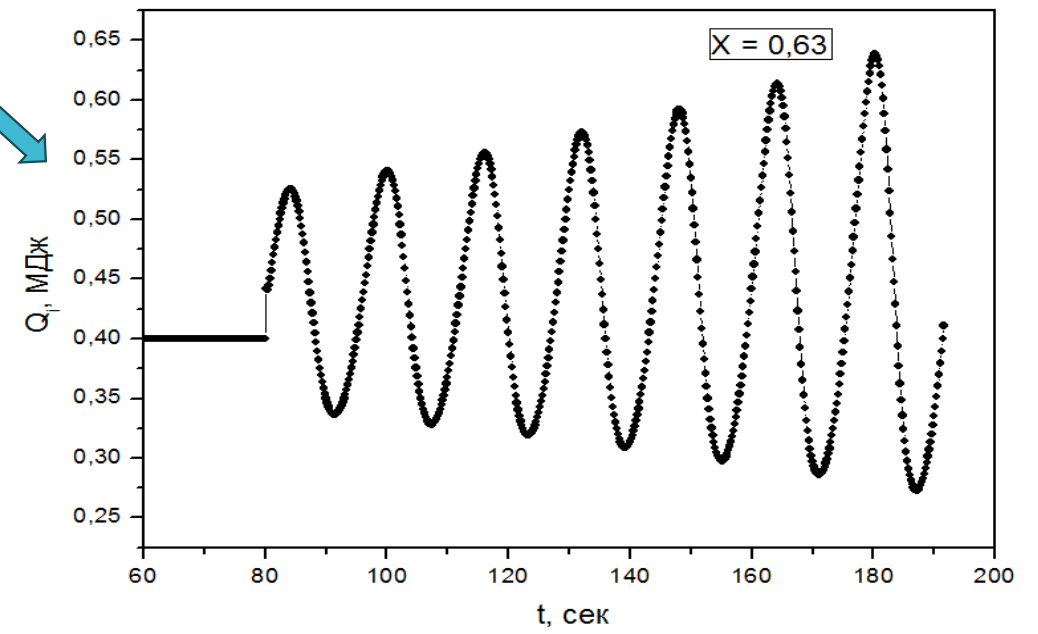


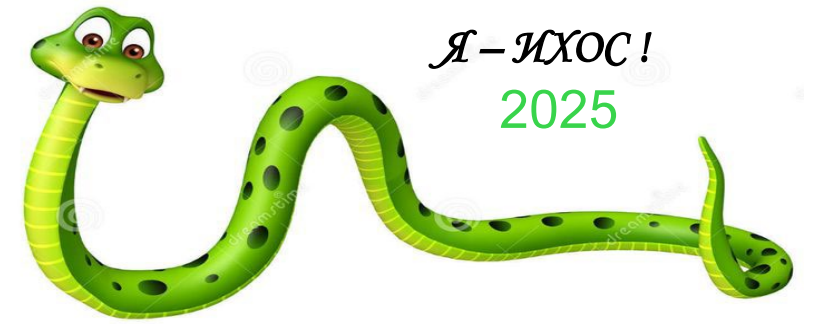
На рис. показано расчетное развитие неустойчивости ИБР-2М при уменьшении амплитуды ИХОС (экспериментальной, 3 эксп)



расчетная ИХОС

2024





Я – ИХОС!
2025

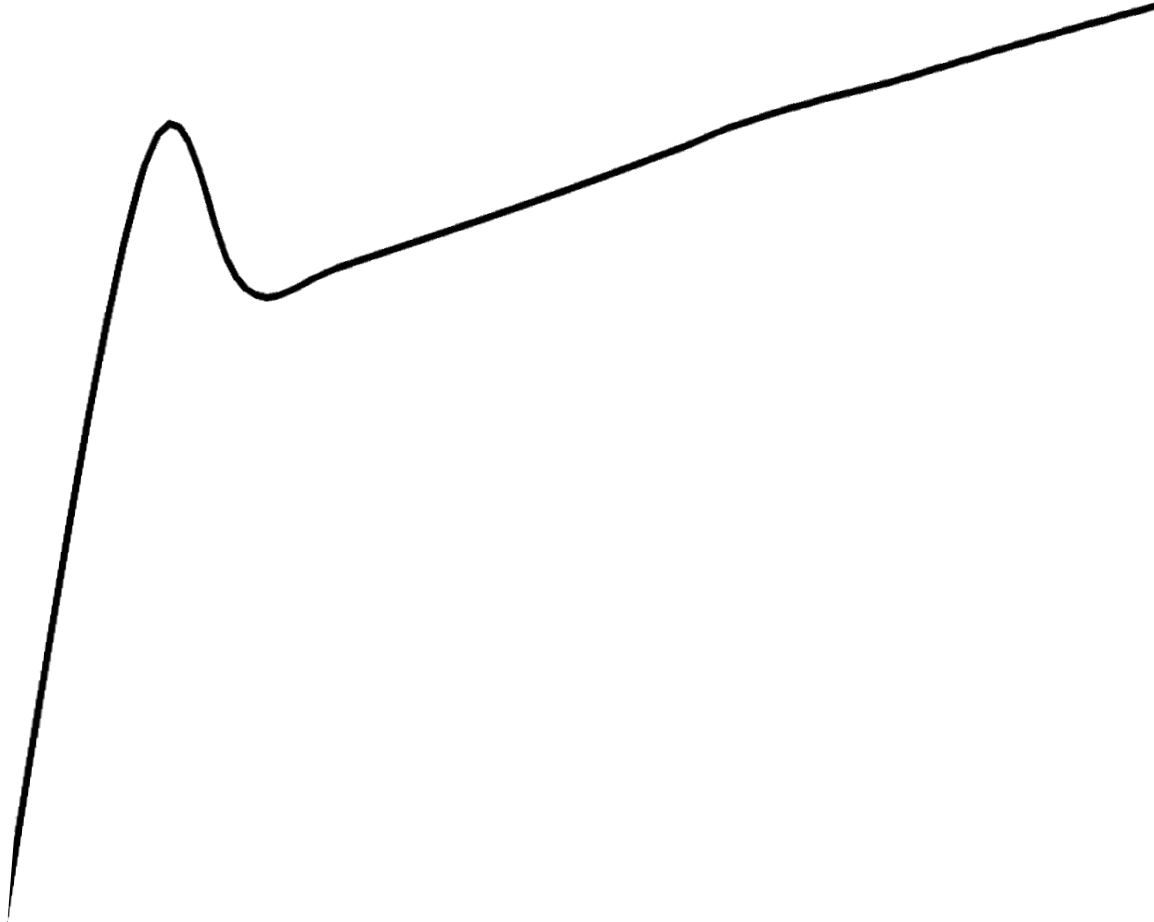
Download from
Dreamstime.com

2024 !



Выводы

1. Установлены причины неустойчивости мощности П.Р. при компоновке А.З. тепловыделяющими сборками (ТВС) и оценены параметры, влияющие на колебательную устойчивость. Погрешности расчета требуют уточнения .
2. Используемая сейчас трехэкспоненциальная модель динамики не соответствует реальным процессам, хотя и дает близкие результаты. Это затрудняет целенаправленно решать проблемы устранения неустойчивости.



**КОНЕЦ МУЧЕНИЙ,
как следствие учений.**



После доклада:

Прилагаю письменно более определенный ответ на один из вопросов, а именно:
« Почему на реакторе БР-5 не наблюдались автоколебания? »

Положительная компонента обратной связи на БР-5 имелась (это описано в статье журнала Атомная Энергия), что обнаруживалось при малых расходах натрия. Но изгиб ТВС, ответственный за положительную компоненту обратной связи, пропорционален градиенту плотности потока нейтронов, который значительно меньше на БР-5 вследствие более эффективного отражателя нейтронов (зона воспроизводства с ураном 238, отсутствие подвижного отражателя). Кроме того, на феномен автоколебаний влияют доля запаздывающих нейтронов в БР- или импульсная доля в ИБР-2, а там соотношение 15:1 для плутониевой зоны и 40:1 для урановой.

Таким образом, на БР-5 могли бы появиться автоколебания при мощности более 30-50 МВт.