



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Интегральные эксперименты с размножающими системами из металлического плутония в α и δ -фазах

Адарченко В.А., Андреев С.А., Бесов С.С., Вайвод А. А.,
Ершова Л.С., Хмельницкий Д.В., Юдов А.А.

Всероссийская конференция «Нейтроника-2024»,
АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск,
28 мая – 31 мая 2024 года

Библиотека интегральных опытов РФЯЦ-ВНИИТФ



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Эксперименты РФЯЦ-ВНИИТФ на критическом стенде [1]

- Материалы: Pu и U в различных комбинациях, в отражателе или без.
- Измеряемые величины: параметры критического состояния, «время жизни», $\beta_{эф}$, спектральные индексы.
- Прецизионная расчетная модель опыта.

Для чего нужны новые эксперименты?

В дополнение к ядерно-физическим расчетам [2] и дифференциальным экспериментам [3] для

- исключения компенсирующих ошибок в ядерных данных [4],
- аттестации кодов.

[1] Атомная энергия. Т.110, вып.4, 2011, с.231-236;

Т.114, вып.3, 2013, с.165-168; Т.135, вып.1, 2024, с.16-21.

[2] D.Neudecker et al., Phys. Rev. C 104, 034611 (2021)

[3] L.Snyder "Measurement of the $^{239}\text{Pu}(n,f)/^{235}\text{U}(n,f)$ Cross-Section Ratio with the NIFFTE fission Time Projection"

ND2022 <https://indico.frib.msu.edu/event/52/contributions/636/>

[4] D.Neudecker "Where Could Compensating Errors Hide in ENDF/B-VIII.0?"

ND2022 <https://indico.frib.msu.edu/event/52/contributions/771/>

Опыты с четырьмя РС из Pu

Материал и геометрия.

Низкофоновый плутоний в α -фазе (диски) и δ -фазе (полусферы)

Контроль критичности – изменение зазора между верхней и нижней частями (ВЧ и НЧ)

Состав РС

	305	369-1	417	418
ВЧ	10Д+5ПС	12Д	7Д+5ПС	8Д+5ПС
НЧ	4ПС	5Д	5ПС	5ПС

ПС – полусфера, Д – диск



РС369-1 [4]

Эксперимент по определению

- 1) критзазора $N_{кр}$
 - 2) «времени жизни» τ , $\beta_{эф}$, α_R
- +

Расчетная модель



τ и β :

что измеряется на самом деле?

α – асимптотическая постоянная спада, τ – время жизни, β – эффективная доля запаздывающих нейтронов
 k – эффективный коэффициент умножения нейтронов.

Утверждение: τ и β определяются по измерениям $\alpha(H)$.

$$\alpha(H) = \frac{k(H) - 1}{\tau(H)} \quad (1)$$

Из соотношения (1) для производных по параметру H

$$\frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{k'}{k-1} - \frac{\tau'}{\tau} \quad (2)$$

Приближение: τ слабо зависит от H вблизи $H_{кр}$,

$$\frac{k'}{k-1} \gg \frac{\tau'}{\tau} \text{ тогда } \frac{\alpha'}{\alpha} \approx \frac{k'}{k-1} \text{ откуда } \tau \approx \frac{k'}{\alpha'} \text{ и } \beta = -\alpha_R \tau.^*$$

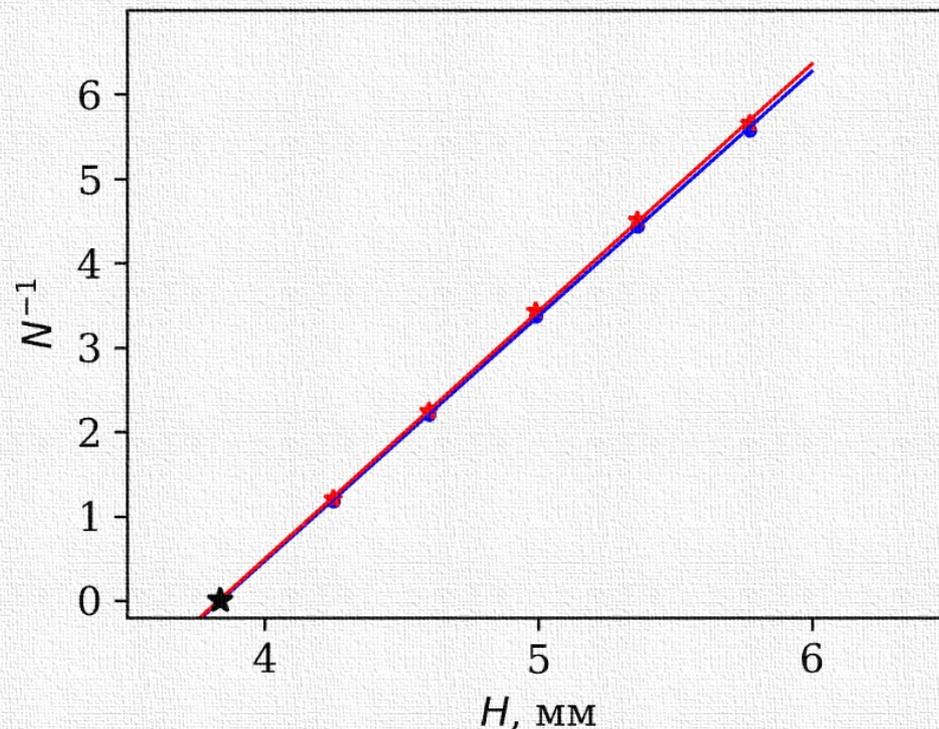
α' и α_R вычисляются по результатам измерений,
 k' достоверно определяется из расчета (небольшая погрешность <1%, не зависит от выбора констант).

Эксперименты



Определение критического состояния

Пример. Определение $N_{\text{кр}}$ РС369-1



$N(H)$ – скорость счета*.
Красные и синие точки – результаты измерений.
Линии – интерполяции МНК.

Черная точка – экстраполяция $N^{-1}(H)$ в ноль.

$$N_{\text{кр}} = 3.84 \pm 0.04 \text{ мм}$$

Достоверность:

- Два детектора,
- Малая погрешность $\delta N^{-1} < 0.25\%$

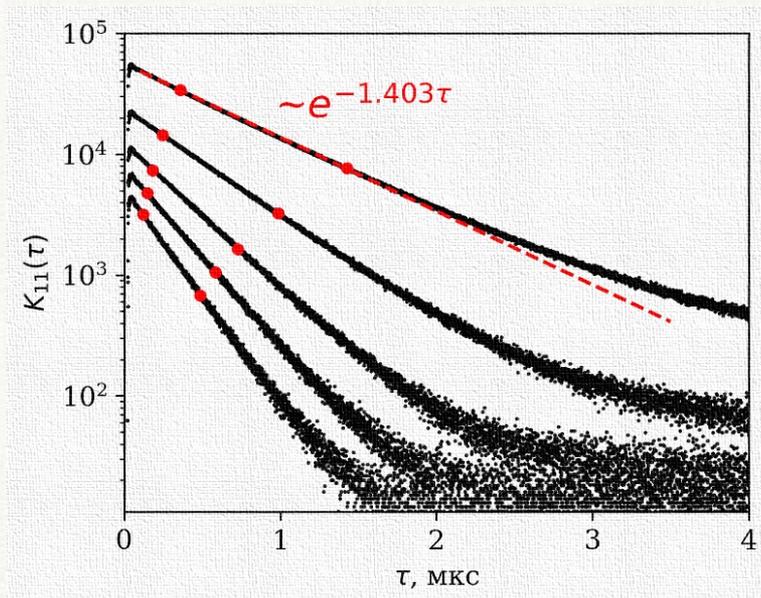
*источник нейтронов – собственный нейтронный фон

Корреляционные измерения постоянной спада $\alpha(H)$

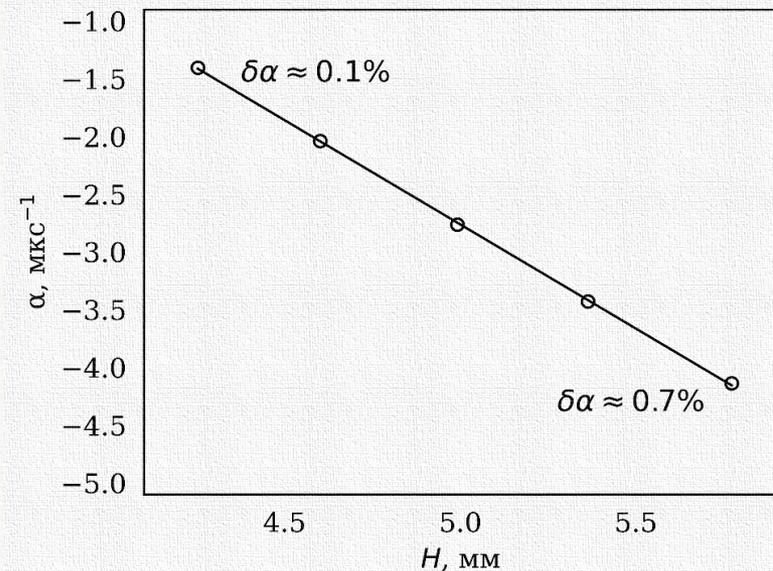
Временная зависимость корреляционной функции $K(t)$ сигнала детектора $x(t)$, регистрирующего частицы от РС с постоянным нейтронным источником, имеет экспоненциальный вид [5]

$$K(t) \sim e^{\alpha t}$$

Пример. Измерения постоянной спада РС369-1



Автокорреляционные функции первого детектора при различных H



Зависимость $\alpha(H)$, построенная по данным для первого детектора

Расчетная интерпретация



Свойства моделей РС

1. Подробное описание геометрии РС

Размеры деталей заданы по КД с минимальными приближениями

2. Моделирование методом Монте-Карло (ПРИЗМА [6])

- $K_{эф}$ – метод поколений для решения условно-критической задачи,
- α – решение задачи с источником,
- $K_{эф}(H)$, $\alpha(H)$ – многовариантные расчеты методом коррелированной выборки [7].

3. Ядерные константы с непрерывным представлением зависимости от энергии нейтронов (БРОНД-3.1, ENDF/B-VII.1, JENDL-4.0, JEFF-3.2).

*КД – конструкторская документация

[6] Зацепин О.В. и др. Расчеты методом Монте-Карло по программе ПРИЗМА нейтронно-физических характеристик активной зоны ВВЭР-100 // ВАНТ. Физика ядерных реакторов, 2011, Вып. 4, с. 64-73

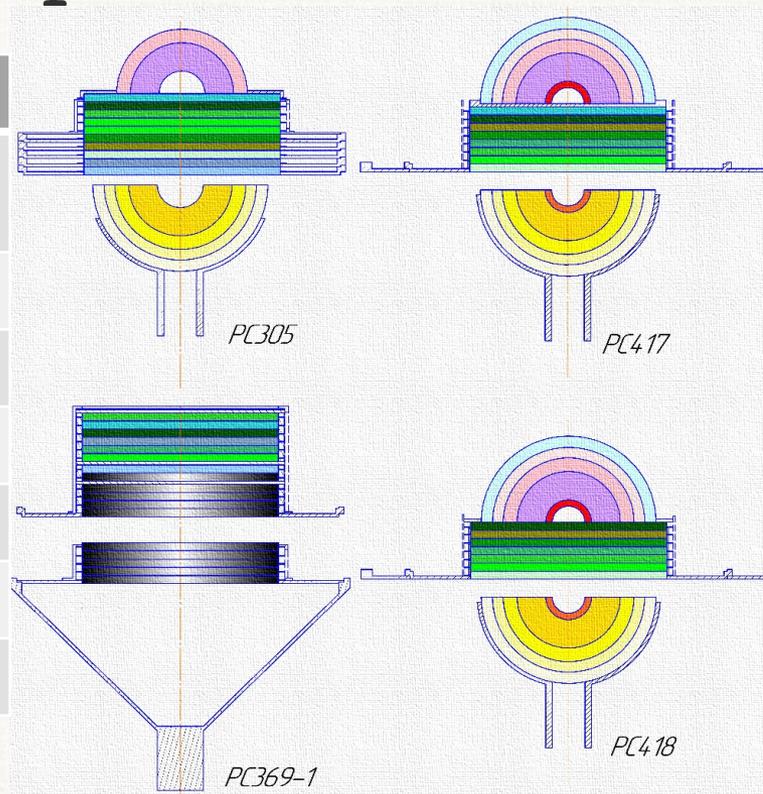
[7] Кандиев Я.З. и др. Оценка эффекта малых возмущений в многовариантных расчетах по программе ПРИЗМА-Д // Атомная энергия.-2005.-Т.99. Вып. 3. с. 203-210.

Оценка ковариационной матрицы экспериментальной погрешности

	417	418	305	369
погрешность* модели, %	0.13	0.13	0.11	0.16

Корреляционная матрица

РС	417	418	305	369
417	1	0.91	0.82	0.23
418	0.91	1	0.79	0.17
305	0.82	0.79	1	0.36
369	0.23	0.17	0.36	1



Эскизы расчетных моделей РС.
Цветом отмечены одинаковые детали

$K_{эф}$ в расчетах с различными СК



Для «случайных» параметров в моделях РС заданы средние значения

Расчеты ПРИЗМА условно-критической задачи

	417	418	305	369
погрешность	0.0013	0.0013	0.0011	0.0016
ENDF/V-VII.1	0.99917	0.99880	1.00025	0.99919
БРОНД-3.1	0.99783	0.99736	0.99885	0.99793
JEFF-3.2	0.99941	0.99908	1.00024	0.99896
JENDL-4.0	0.99698	0.99664	0.99808	0.99705

Результаты расчетов попали в 2σ погрешностей моделей (JENDL и БРОНД на нижней границе)

* Оценка статистической погрешности расчетов $\delta k \approx 0.002\%$
(число историй в пакете 10^3 , число сосчитанных пакетов $\sim 10^6$)

Расчеты «времени жизни»

1. Корр. расчеты $k(H), \alpha(H), N(H)$ на сетке по H

- $k(H)$ Расчеты $K_{эф}$ в рамках условно-критической задачи ¹⁾
- $\alpha(H)$ Расчеты временных зависимостей функционалов нейтронного потока $F(t)$ в задаче с мгновенным источником ²⁾. Интерполяция вида $F(t) \sim e^{\alpha(H)t}$
- Расчет α_R в критическом состоянии ³⁾

2. Постобработка

- МНК для $k(H), \alpha(H)$ дает ⁴⁾ $\alpha', k', \tau = \frac{k'(H)}{\alpha'(H)}$
- $\beta = -\alpha_R \tau$ или $\beta = (k_{полн} - k_{мгн}) / k_{полн}$

¹⁾ В рамках условно-критической задачи без учета запаздывающих нейтронов

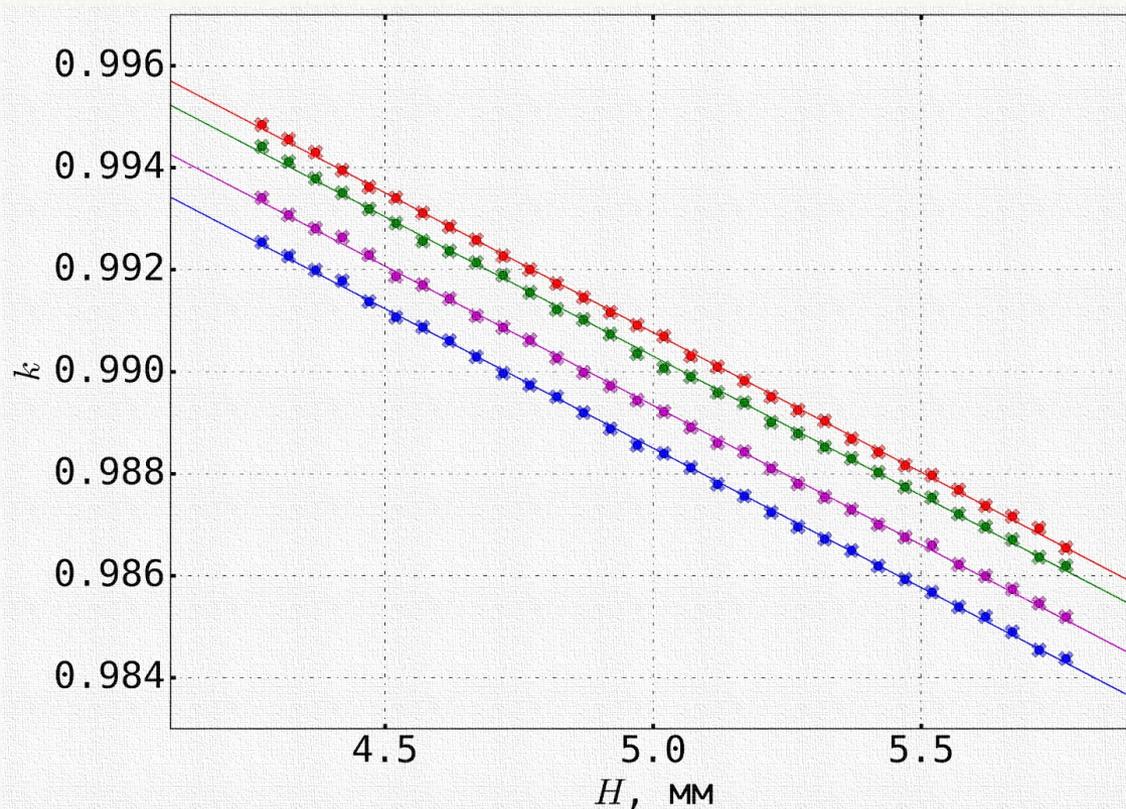
²⁾ Сетка по t от 0 до 4 мкс с шагом 20 нс, F - числа делений, например.

³⁾ Крит. состояние определяется интерполяцией $k(H)$ в точку $k(H)=1$.

⁴⁾ Погрешность определения α', k' определяется из погрешностей МНК

Результаты расчетов $k(H)$

Пример. Расчеты $k(H)$ для РС369-1



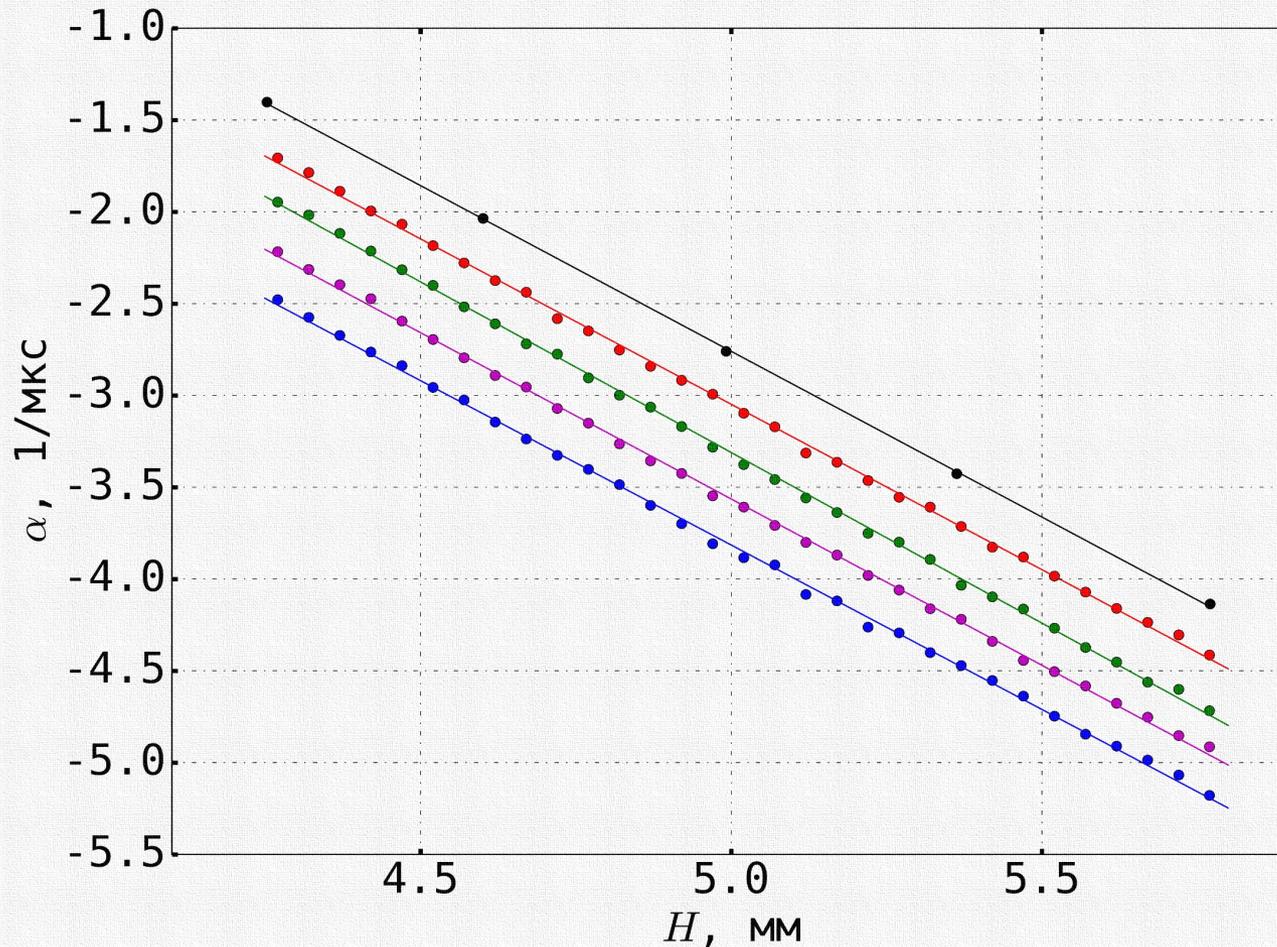
	$\frac{dk}{dH} \cdot 10^3$
В-VII.1	-5.479
БРОНД-3.1	-5.465
JEFF-3.1	-5.465
JENDL-4.0	-5.468
среднее	-5.469

$$\tau \approx \frac{k'}{\alpha'}$$

Отличие в dk/dH
не более 0.6%
Аналогично для
остальных РС

Красный - ENDF\B-VII.1, фиолетовый - БРОНД-3.1,
зеленый - JEFF-3.2, синий - JENDL-4.0

Результаты расчетов $\alpha(H)$



Красный - ENDF\B-VII.1, фиолетовый - БРОНД-3.1,
зеленый - JEFF-3.2, синий - JENDL-4.0, черный - эксперимент

Результаты расчетов τ и β

		417		418		369		305	
		сред	отл	сред	отл	сред	отл	сред	отл
$\tau = \frac{k'}{\alpha'}$ НС	ENDF/B-VII	3.03	-6%	2.92	-8%	3.04	0%	2.92	1%
	БРОНД-3.1	3.02	-6%	2.93	-8%	3.02	-1%	2.94	2%
	JEFF-3.2	2.95	-9%	2.86	-10%	2.94	-3%	2.86	-1%
	JENDL-4.0	3.04	-6%	2.96	-7%	3.05	1%	2.92	1%
	Эксперимент	3.23±0.02		3.18±0.02		3.03±0.02		2.88±0.02	
$\beta \cdot 10^3$	ENDF/B-VII	1.82	-22%	1.78	-26%	1.84	-8%	1.84	-10%
	БРОНД-3.1	2.01	-13%	2.07	-14%	2.02	0%	2.08	2%
	JEFF-3.2	2.05	-12%	2.08	-14%	2.11	5%	2.00	-2%
	JENDL-4.0	2.00	-14%	2.05	-15%	2.03	1%	1.97	-4%
	Эксперимент	2.32±0.06		2.42±0.06		2.01±0.06		2.05±0.10	

- Для двух РС расчетное τ заметно занижено: $-6 \div 10\%$
- Заметное отличие по β для ENDF/B-VII.1

1 σ -погрешность расчета $\tau \approx 1 - 2\%$, $\beta \approx 1 - 2\%$

Для эксперимента указана абсолютная 2 σ -погрешность

Выводы

Предложены новые прецизионные опыты и расчетные модели для плутониевых систем ($k_{эф}$, τ , β , α_R)

Отмечено

- Хорошее совпадение (в пределах 2σ -погрешности модели) результатов расчетов с опытом для критмассовых измерений
- Для двух РС заметное отличие расчетов от опыта (6–10%) по τ
- Для двух РС заметное отличие расчетов от опыта (около 10%) по β (для ENDF\B-VII для всех РС)

Спасибо за внимание

Адарченко Владимир Анатольевич
СНС РФЯЦ-ВНИИТФ

Тел.: +7 (351-46) 56560
E-mail: v.a.adarchenko@vniitf.ru



Корреляционные измерения постоянной спада $\alpha(N)$

Предположения: стационарность и эргодичность.

1. Измерения в счетном режиме нейтронов и γ -квантов от РС (нейтронный источник – собственный фон Pu); $x_1(t_n)$, $x_2(t_n)$ – числа событий регистрации частиц 1-м и 2-м детектором на временном интервале δ около момента времени $t_n = n\delta$.
2. Статистическая обработка сигналов

$$K_{ij}(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_i(t_n + t)x_j(t_n) - \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_i(t_n + t) \right) \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_j(t_n) \right)$$

Утверждение [5]: если постоянная спада α существует, то

$$K_{ij}(t) \sim e^{\alpha t}$$

Условия измерений:

$\delta = 1$ нс, $N \sim 10^{12}$, число событий $\sim 10^5$ на канал, $t \leq T \sim 1$ мкс
скорость счета событий $\dot{x}_i(t) \ll \delta^{-1}$ (т.е. $x_i(t_n) = 0$ или 1).

Реализация: программно-аппаратурный комплекс NMIS [6]

[5] Р.Уриг Статистические методы в теории ядерных реакторов. М.:Атомиздат, 1974

[6] Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 450 (2000) 531-555

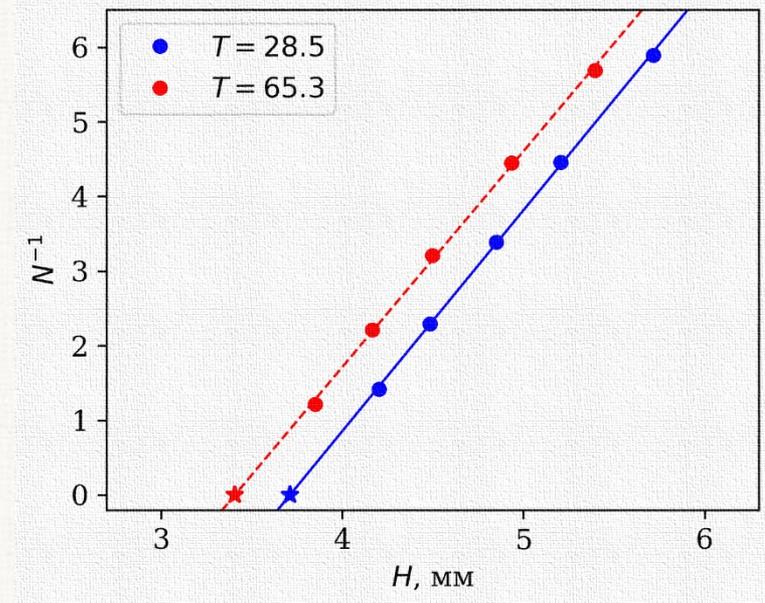
Дополнение 1. Учет разогрева



Разогрев РС* заметно влияет на реактивность!

Оценка влияния – измерение $H_{кр}$ в разных тепловых режимах с контролем температуры.

- Стабилизация температуры принудительным воздушным охлаждением.
- Выбор характеристики разогрева – температура T в центре РС.
- Измерение $H_{кр}$ в двух тепловых режимах (максимальное охлаждение, без охлаждения)



Пример. dH/dT для РС369-1.

$$dH/dT = 0.00815 \text{ мм/}^\circ\text{C}$$

$$H_{кр} = 3.71 \pm 0.04 \text{ мм} \quad T = 28.5^\circ\text{C}$$

$$H_{кр} = 3.41 \pm 0.04 \text{ мм} \quad T = 65.3^\circ\text{C}$$

dH/dT учитывается при построении расчетной модели

*из-за α -распада Pu



Дополнение 2: k, α, β, τ

Уравнение переноса (без учета запаздывающих)

$$\frac{\varphi_t}{v} + L\varphi = F\varphi$$

Задачи на СФ/СЗ:

$$\frac{\alpha}{v}\varphi_\alpha + L\varphi_\alpha = F\varphi_\alpha \quad (1) \quad \text{и} \quad L\varphi_k = k^{-1}F\varphi_k \quad (2).$$

Предположения и приближения:

- Для (1) и (2) существуют старшие СЗ,
- $1 - k \ll 1$,
- $(\varphi_k^+, L\varphi_\alpha) \approx (\varphi_\alpha^+, L\varphi_k)$, $(\varphi_k^+, F\varphi_\alpha) \approx (\varphi_\alpha^+, F\varphi_k)$

Тогда

$$\alpha(\varphi_k^+, v^{-1}\varphi_\alpha) = (k - 1)(\varphi_k^+, F\varphi_\alpha) \quad (3)$$

Время жизни

$$\tau := \frac{(\varphi_k^+, v^{-1}\varphi_\alpha)}{(\varphi_k^+, F\varphi_\alpha)}, \quad \alpha = \frac{k - 1}{\tau}$$

Росси-альфа $\alpha_R := \alpha(H_{\text{КР}})$.

Эффективная **доля запаздывающих** нейтронов $\beta = -\alpha_R\tau$. 20

Дополнение 3. Сводная таблица



		РС417			РС418			РС369-1			РС305		
		сред	погр	отл	сред	погр	отл	сред	погр	отл	сред	погр	отл
$\frac{d\alpha}{dH}$ $\text{МКС}^{-1}\text{ММ}^{-1}$	ENDF\B-VII.1	-1.422	0.007	6%	-1.780	0.005	9%	-1.802	0.009	0%	-1.502	0.009	-1%
	БРОНД-3.1	-1.424	0.010	7%	-1.776	0.012	9%	-1.812	0.008	0%	-1.493	0.008	-2%
	JEFF-3.1	-1.460	0.010	9%	-1.813	0.013	11%	-1.859	0.008	3%	-1.548	0.010	2%
	JENDL-4.0	-1.421	0.007	6%	-1.759	0.010	8%	-1.791	0.010	-1%	-1.500	0.009	-2%
	Эксперимент	-1.336	0.006		-1.635	0.006		-1.803	0.006		-1.524	0.008	
$\frac{dk}{dH} \cdot 10^3$	ENDF\B-VII.1	-4.311	0.019		-5.192	0.024		-5.479	0.019		-4.383	0.020	
	БРОНД-3.1	-4.305	0.018		-5.206	0.030		-5.465	0.023		-4.395	0.021	
	JEFF-3.1	-4.305	0.016		-5.193	0.027		-5.465	0.025		-4.434	0.018	
	JENDL-4.0	-4.314	0.024		-5.209	0.029		-5.468	0.020		-4.375	0.077	
	Среднее	-4.309	0.010		-5.200	0.014		-5.469	0.011		-4.397	0.021	
$\alpha, \text{МКС}^{-1}$	ENDF\B-VII.1	-0.6012		-17%	-0.6111		-20%	-0.6066		-9%	-0.6307		-11%
	БРОНД-3.1	-0.6667		-7%	-0.7076		-7%	-0.6685		1%	-0.7072		-0%
	JEFF-3.1	-0.6942		-4%	-0.7246		-5%	-0.7163		8%	-0.6984		-2%
	JENDL-4.0	-0.6571		-9%	-0.6921		-9%	-0.6658		0%	-0.6767		-5%
	Эксперимент	-0.720	0.009		-0.760	0.008		-0.663	0.008		-0.710	0.016	
$\tau, \text{нс}$	ENDF\B-VII.1	3.032	0.020	-6%	2.916	0.016	-8%	3.041	0.018	0%	2.917	0.022	1%
	БРОНД-3.1	3.020	0.024	-6%	2.932	0.027	-8%	3.016	0.019	-1%	2.944	0.021	2%
	JEFF-3.1	2.948	0.023	-9%	2.865	0.025	-10%	2.941	0.019	-3%	2.865	0.022	-1%
	JENDL-4.0	3.035	0.022	-6%	2.961	0.024	-7%	3.054	0.020	1%	2.916	0.054	1%
	Эксперимент	3.226	0.015		3.180	0.015		3.033	0.011		2.884	0.021	
$\beta \cdot 10^3$ ($k_{\text{полн}} - k_{\text{мгн}}$)	ENDF\B-VII.1	1.82	0.03	-22%	1.85	0.03	-23%	1.86	0.03	-8%	1.82	0.03	-11%
	БРОНД-3.1	2.03	0.03	-13%	2.06	0.03	-15%	2.06	0.03	2%	2.08	0.03	2%
	JEFF-3.1	2.07	0.03	-11%	2.05	0.03	-15%	2.09	0.03	4%	2.06	0.03	1%
	JENDL-4.0	1.96	0.03	-16%	2.05	0.03	-15%	1.99	0.03	-1%	2.07	0.03	1%
	Эксперимент	2.32	0.03		2.42	0.03		2.01	0.03		2.05	0.03	

Дополнение 4. Альтернативный способ расчета β

$$\beta = \frac{k_{\text{ПОЛН}} - k_{\text{МГН}}}{k_{\text{ПОЛН}}}$$

		417		418		369		305	
		сред	отл	сред	отл	сред	отл	сред	отл
$\tau = \frac{k'}{\alpha'}$ НС	ENDF\B-VII	3.03	-6%	2.92	-8%	3.04	0%	2.92	1%
	БРОНД-3.1	3.02	-6%	2.93	-8%	3.02	-1%	2.94	2%
	JEFF-3.2	2.95	-9%	2.87	-10%	2.94	-3%	2.87	-1%
	JENDL-4.0	3.04	-6%	2.96	-7%	3.05	1%	2.92	1%
	Эксперимент	3.23±0.02		3.18±0.02		3.03±0.02		2.88±0.02	
$\beta \cdot 10^3$	ENDF\B-VII	1.82	-22%	1.85	-23%	1.86	-8%	1.82	-11%
	БРОНД-3.1	2.03	-13%	2.06	-15%	2.06	2%	2.08	2%
	JEFF-3.2	2.07	-11%	2.05	-15%	2.09	4%	2.06	1%
	JENDL-4.0	1.96	-16%	2.05	-15%	1.99	-1%	2.07	1%
	Эксперимент	2.32±0.06		2.42±0.06		2.01±0.06		2.05±0.10	

Дополнение 5



Отличие двух способов расчета времени жизни:

$$\tau_1 = \frac{k'}{\alpha'}$$

по результатам расчетов $k(N)$, $\alpha(N)$,

τ_2 - время жизни поколения (от деления до деления)
в рамках решения условно-критической задачи

		417	418	369	305
τ_1, HC	ENDF\B-VII	3.03	2.92	3.04	2.92
	БРОНД-3.1	3.02	2.93	3.02	2.94
	JEFF-3.2	2.95	2.87	2.94	2.87
	JENDL-4.0	3.04	2.96	3.05	2.92
τ_2, HC	ENDF\B-VII	3.21	3.12	3.16	3.12
	БРОНД-3.1	3.19	3.09	3.14	3.10
	JEFF-3.2	3.12	3.03	3.06	3.03
	JENDL-4.0	3.20	3.10	3.14	3.11
$\frac{\tau_1 - \tau_2}{\tau_2}, \%$	ENDF\B-VII	-6%	-6%	-4%	-7%
	БРОНД-3.1	-5%	-5%	-4%	-5%
	JEFF-3.2	-5%	-5%	-4%	-5%
	JENDL-4.0	-5%	-4%	-3%	-6%

Погрешность расчета

$$\tau_1 \approx 1 - 2\%$$

$$\tau_2 < 0.01\%$$

Дополнение 6.

Ковариационная матрица погрешностей $K_{ЭФ}$

Случайные параметры

1. Составы (доля ^{239}Pu и ^{240}Pu).
2. Объемы и массы деталей.
3. Критический зазор.

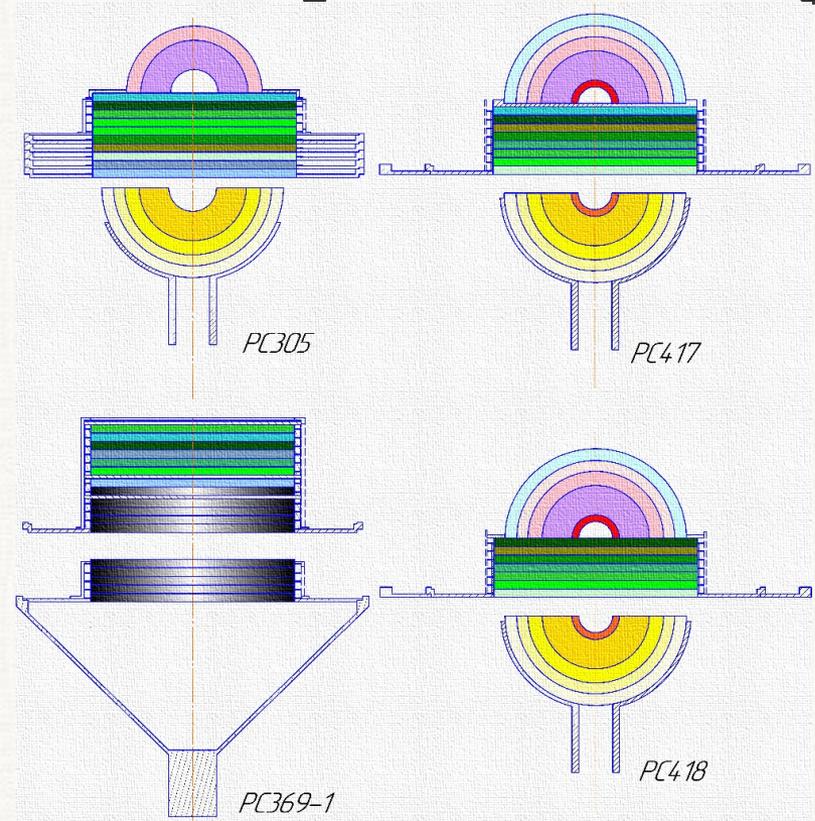
(средние и погрешности из КД, паспортов деталей и измерений)

Корреляция $K_{ЭФ}$ за счет одинаковых деталей в РС ---->

Оценка ковариационной матрицы

$$\langle K_{\mu} \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K_{\mu,i}$$

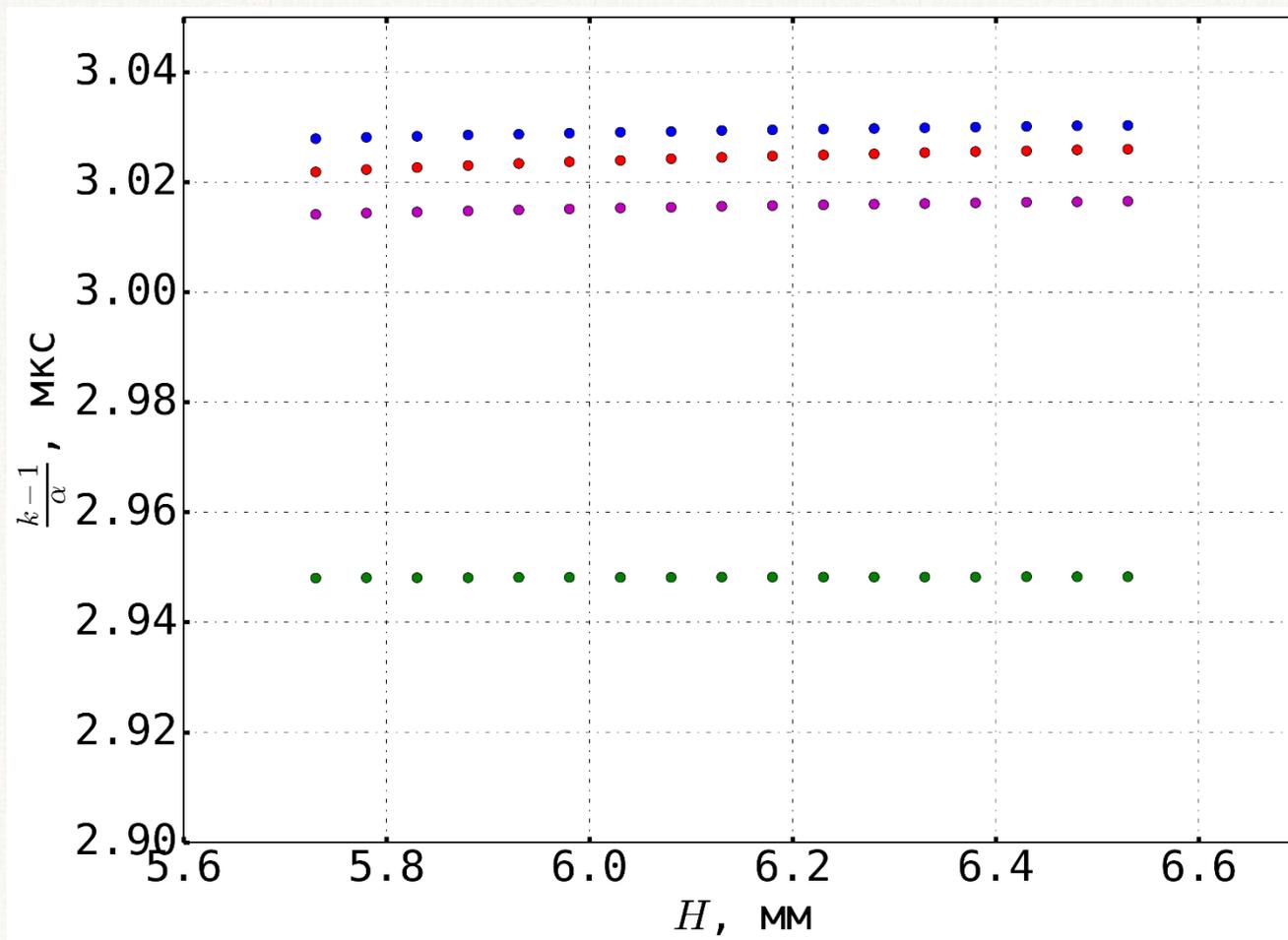
$N=300$ число реализаций случайных параметров, μ – номер сборки, i – номер расчета



Эскизы расчетных моделей РС.
Цветом отмечены одинаковые детали

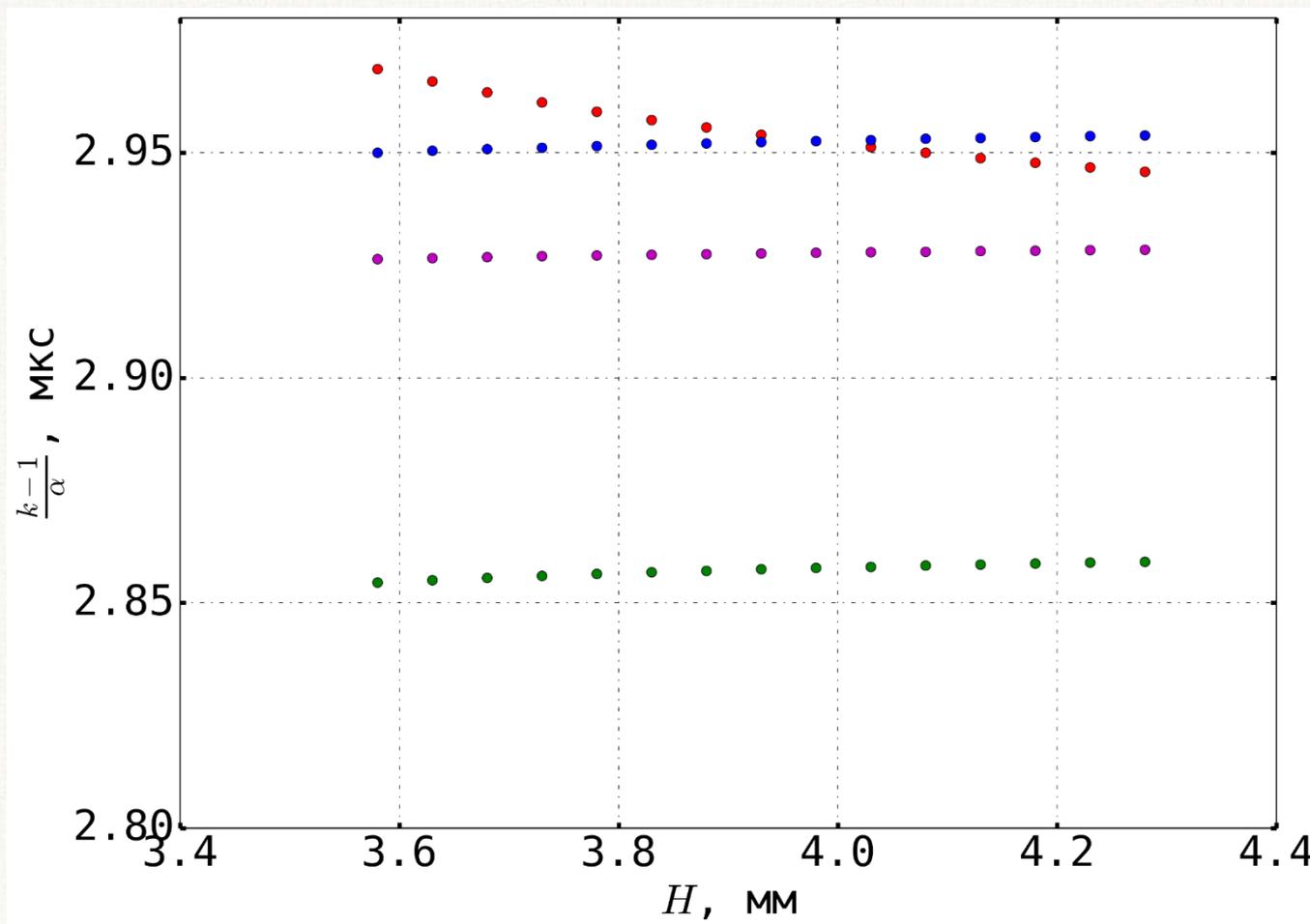
$$C_{\mu\nu} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (K_{\mu,i} - \langle K_{\mu} \rangle)(K_{\nu,i} - \langle K_{\nu} \rangle), r_{\mu\nu} = \frac{C_{\mu\nu}}{\sqrt{C_{\mu\mu}}\sqrt{C_{\nu\nu}}}$$

Дополнение 7



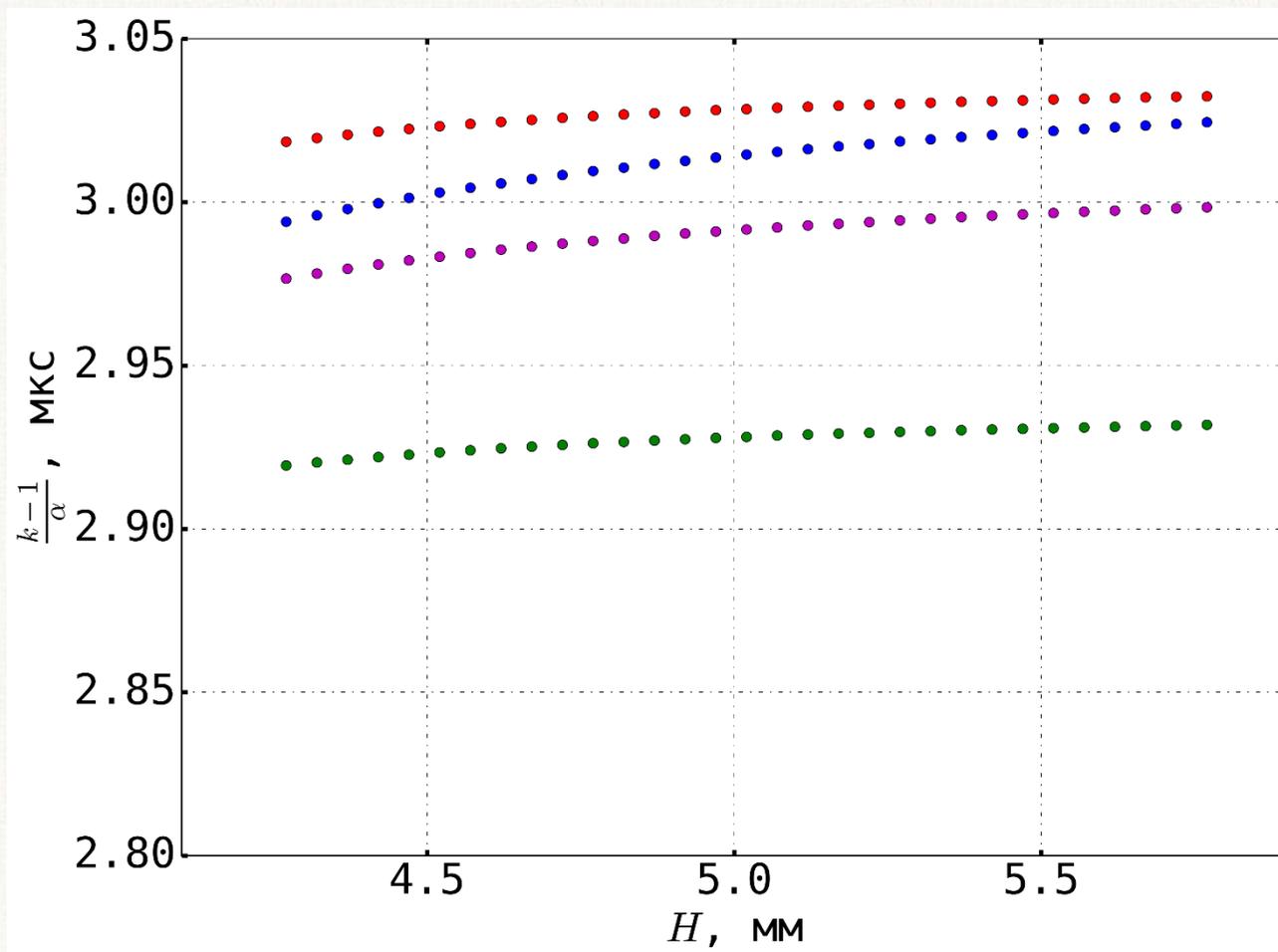
Время жизни для РС417 как функция зазора. $\frac{\tau'}{\tau} \sim 10^{-3}$

Дополнение 7



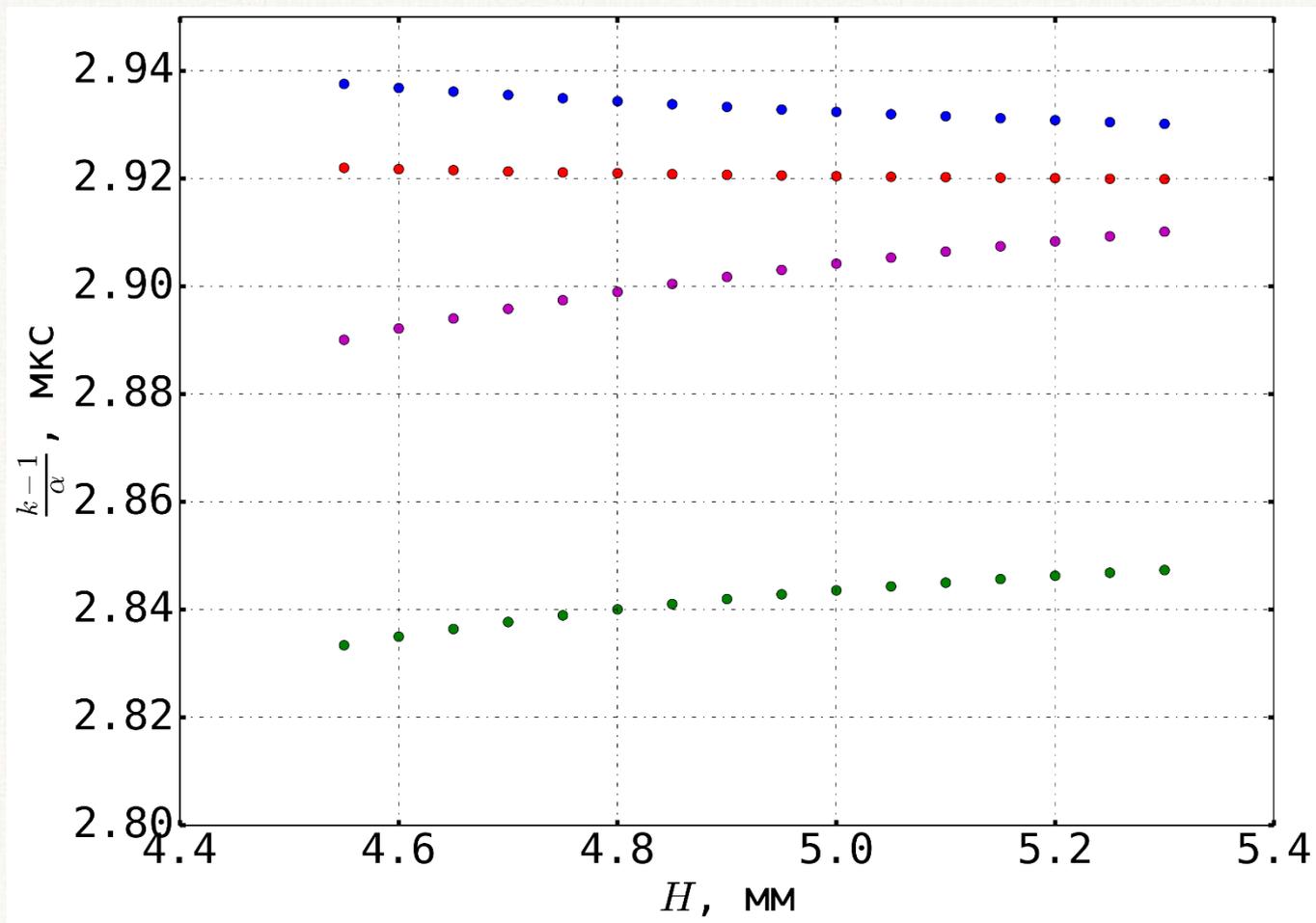
Время жизни для РС418 как функция зазора. $\frac{\tau'}{\tau} \sim 10^{-3}$

Дополнение 7



Время жизни для РС369 как функция зазора. $\frac{\tau'}{\tau} \sim 10^{-3}$

Дополнение 7



Время жизни для РС305 как функция зазора. $\frac{\tau'}{\tau} \sim 10^{-2} - 10^{-3}$