

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ
ПРИМЕНЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО
СПЕКТРОМЕТРА НЕЙТРИНО
iDREAM ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕПЛОВОЙ
МОЩНОСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО
ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Ларин Дмитрий

213М

ПЛАН ДОКЛАДА

- **Измерение тепловой мощности реактора**
- **Нейтринный метод**
- **Реактор как источник электронных антинейтрино**
- **Обратный бета-распад**
- **Детектор iDREAM**
- **Выводы**

ТЕПЛОВАЯ МОЩНОСТЬ РЕАКТОРА

$$W = \frac{k_1 W_{\text{ик}} + k_2 W_{\text{эд}} + k_3 W_{1\text{к}} + k_4 W_{\text{пг}}}{k_1 + k_2 + k_3 + k_4}$$

Где:

- $W_{\text{ик}}$ - тепловая мощность, рассчитанная по сигналам ионизационных камер, МВт;
- $W_{\text{эд}}$ - тепловая мощность, рассчитанная по сигналам эмиссионных датчиков, МВт;
- $W_{1\text{к}}$ - тепловая мощность петель первого контура, МВт;
- $W_{\text{пг}}$ - тепловая мощность, рассчитанная по парогенераторам, МВт;
- k_1, k_2, k_3, k_4 – весовые коэффициенты, учитывающие погрешность измерения величины по данному способу.

ТЕПЛОВАЯ МОЩНОСТЬ РЕАКТОРА

Можно оценить тепловую мощность ядерного реактора, зная ряд параметров:

- Средняя плотность потока тепловых нейтронов в ядерном топливе – $\Phi_{\text{ср}}$ ($\frac{\text{нейтр}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$);
- Объем топлива – V (см^3);
- Коэффициент размножения на быстрых нейтронах – μ ;
- Макроскопическое сечение деления – Σ_f (см^{-1});
- Число делений в секунду при мощности 1Вт – $C = 3.1 \cdot 10^{10}$;

Тепловая мощность тогда:

$$W = \Phi_{\text{ср}} \cdot V \cdot \Sigma_f \cdot \frac{\mu}{C}$$

Где $\Sigma_f = \sigma_f \frac{N_A}{A} \rho$, σ_f – среднее микроскопическое сечение деления (см^{-2}), $N_A = 6.02 \cdot 10^{23}$ – постоянная Авогадро, A – число нуклонов в ядре, ρ – плотность.

НЕЙТРИННЫЙ МЕТОД

Идея удаленного (дистанционного) мониторинга и диагностики активности ядерного реактора и внутриреакторных процессов с помощью нейтринного метода была предложена сотрудниками Курчатовского института Л. Микаэляном и А. Боровым в 1975 году и была успешно подтверждена. Определение средней скорости делений позволяет рассчитать тепловую мощность реактора:

$$W_{\text{яр}} = N_{\text{eff}} \cdot \sum_i \alpha_i \cdot {}^i E_f$$

Число событий, регистрируемых детектором:

$$N_{\text{eff}} = f(N_{e^+}, N_n, \epsilon_{e^+}, \epsilon_n)$$

Скорость счета позитронных событий в детекторе связана с числом событий в реакции обратного бета-распада:

$$N_{e^+} = \epsilon_{e^+} \cdot N_\nu$$

$$N_\nu = \frac{1}{4\pi L^2} \cdot N_p \cdot \langle \sigma_f \rangle \cdot \frac{W}{\langle E_f \rangle}$$

ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА

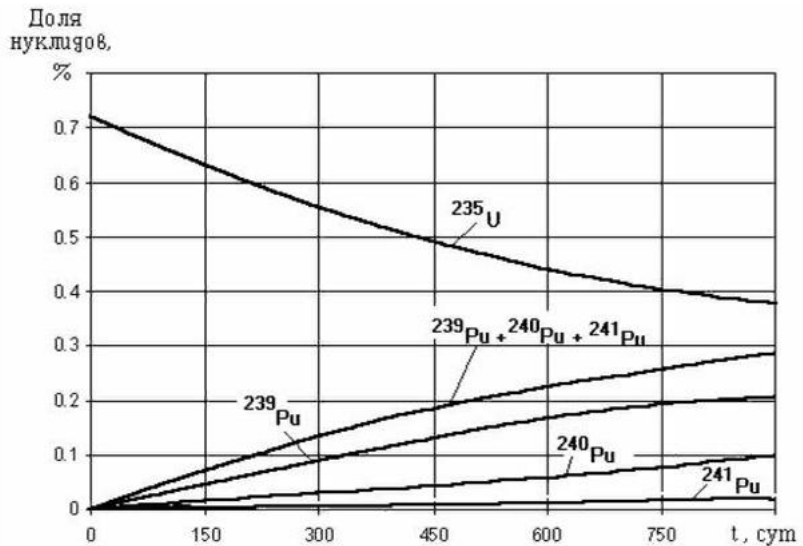


Рис.1 Выгорание ядер $^{235}_{92}\text{U}$ и накопление изотопов Pu в реакторе на естественном уране[1]

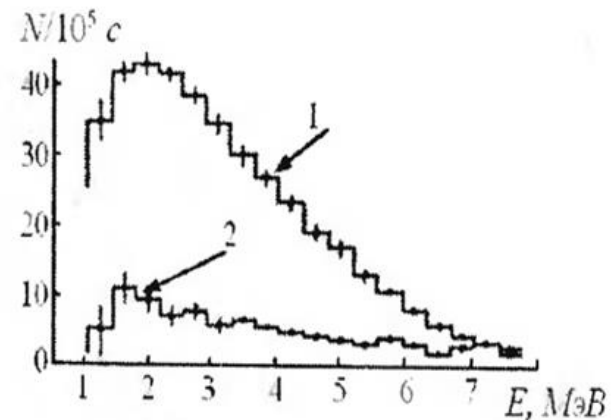


Рис.2 Спектр позитронов реакции обратного бета-распада: при работающем (кривая 1) и остановленном (кривая 2) реакторе[2]

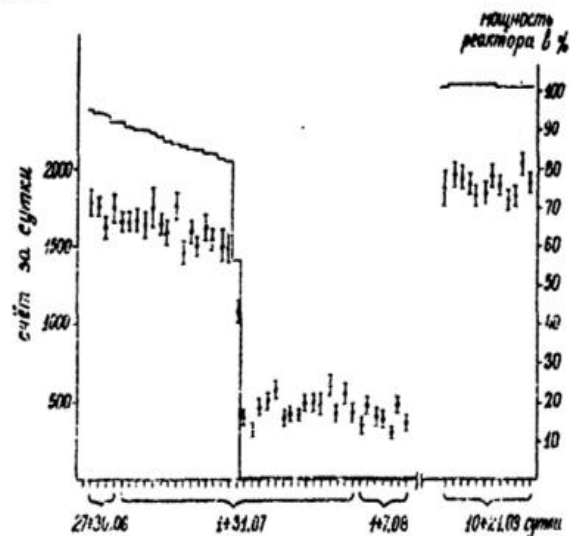


Рис. 3 Измерения при работающем и остановленном реакторе[3]

ИСТОЧНИК РЕАКТОРНЫХ АНТИНЕЙТРИНО

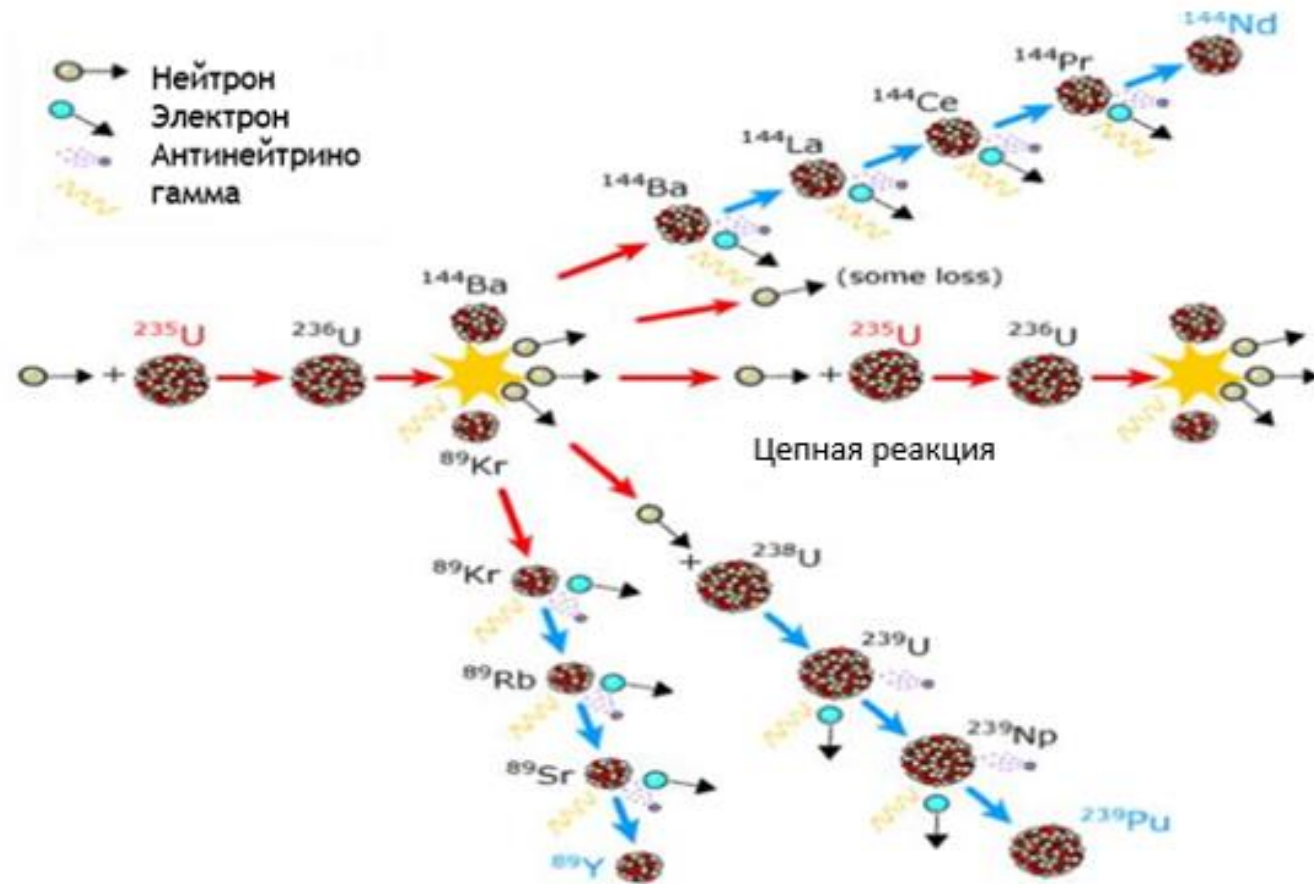


Рис. 4 Цепная реакция деления $^{235}_{92}\text{U}$

ДЕЛЕНИЕ ^{235}U

| | |
|---|-----------------|
| Кинетическая энергия осколков | 165 ± 5 МэВ |
| Энергия нейтронов деления | 7 ± 1 МэВ |
| Энергия мгновенных γ -квантов | $5 \pm 0,5$ МэВ |
| Энергия β -частиц продуктов деления | 7 ± 1 МэВ |
| Энергия γ -излучения продуктов деления | 6 ± 1 МэВ |
| Энергия нейтрино продуктов деления | 10 МэВ |
| Полная энергия на один акт деления | 200 ± 6 МэВ |

СПЕКТР АНТИНЕЙТРИНО

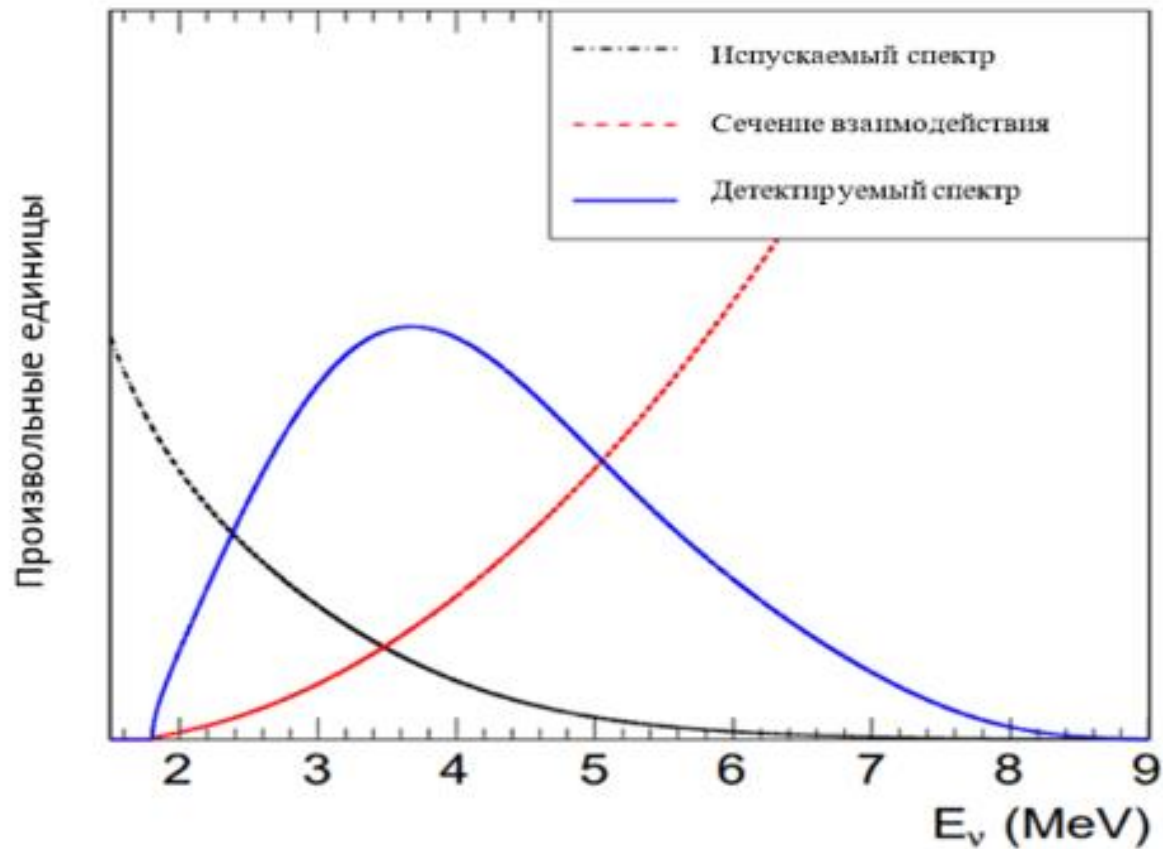


Рис.5 Характерный спектр антинейтрино, вылетевших из реактора для $^{235}_{92}\text{U}$

ОБРАТНЫЙ БЕТА-РАСПАД

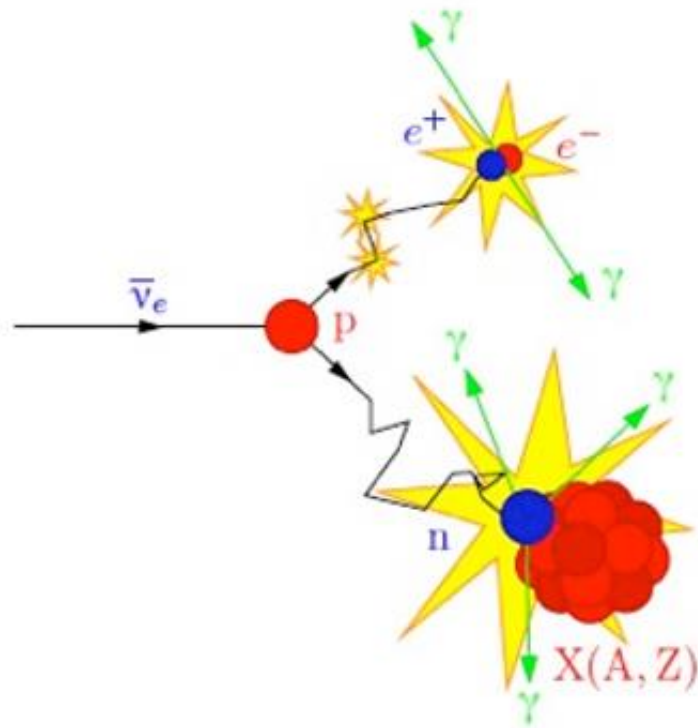


Рис.6 Схема реакции ОБР в среде, обогащенной гадолинием [5]

ДЕТЕКТОР iDREAM

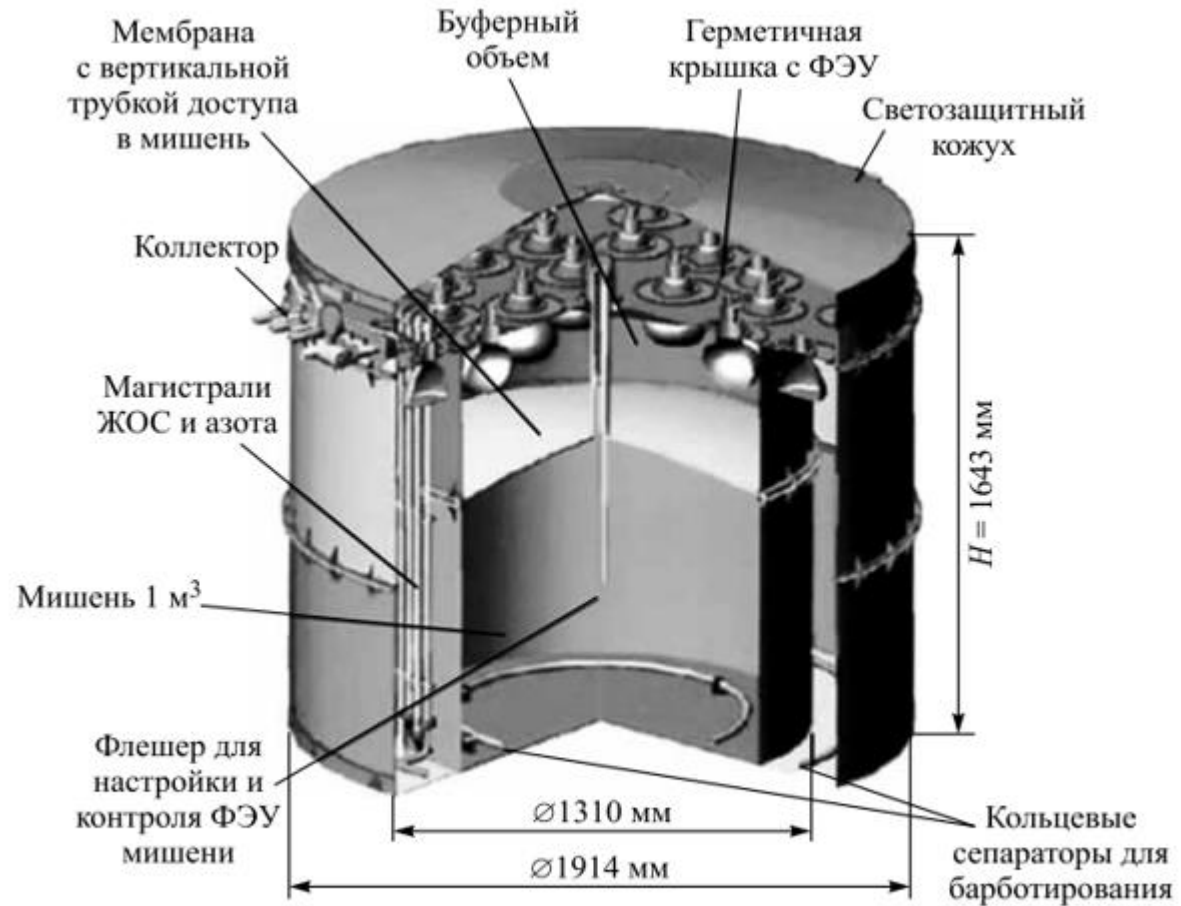


Рис.7 Устройство детектора iDREAM [6]

РАСПОЛОЖЕНИЕ ДЕТЕКТОРА

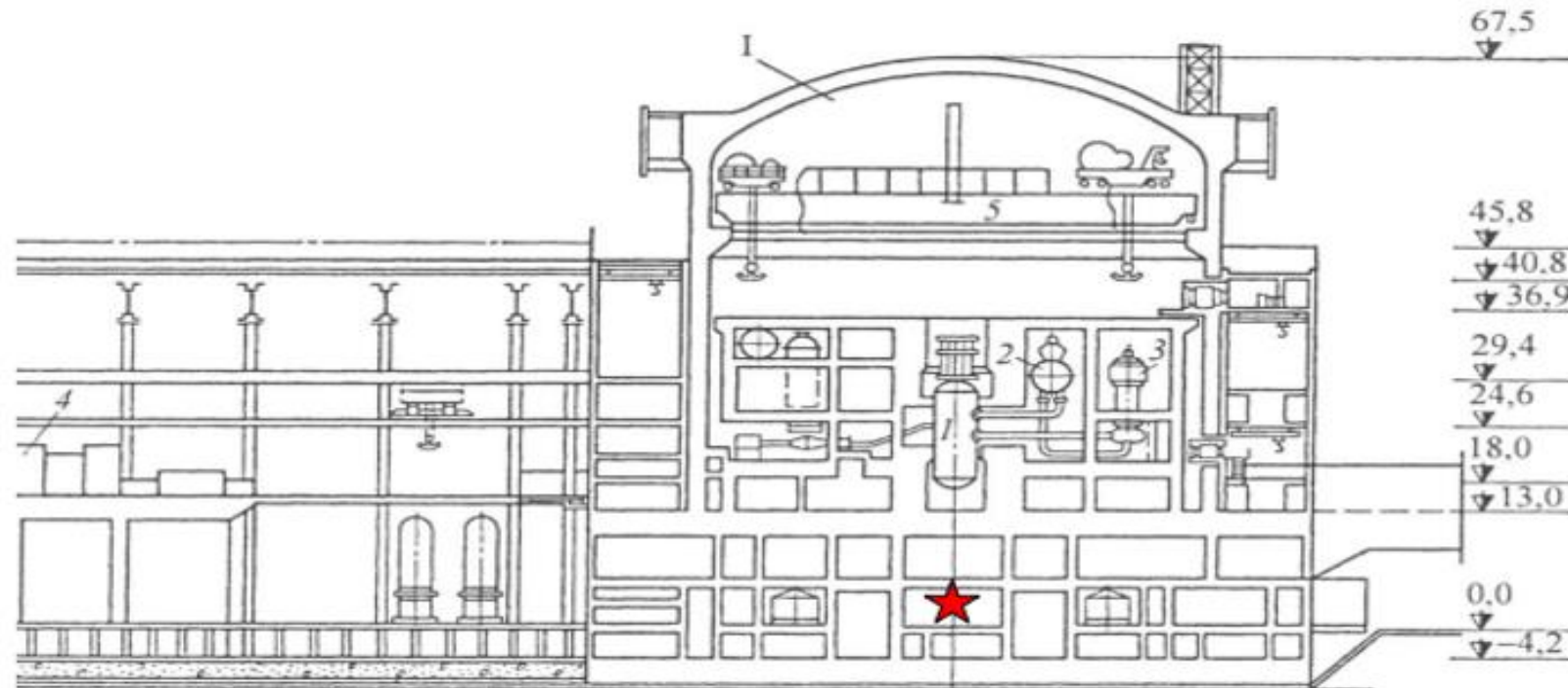


Рис. 8 Возможное расположение детектора iDREAM (показано звездочкой) в главном корпусе АЭС по унифицированному проекту с реактором ВВЭР-

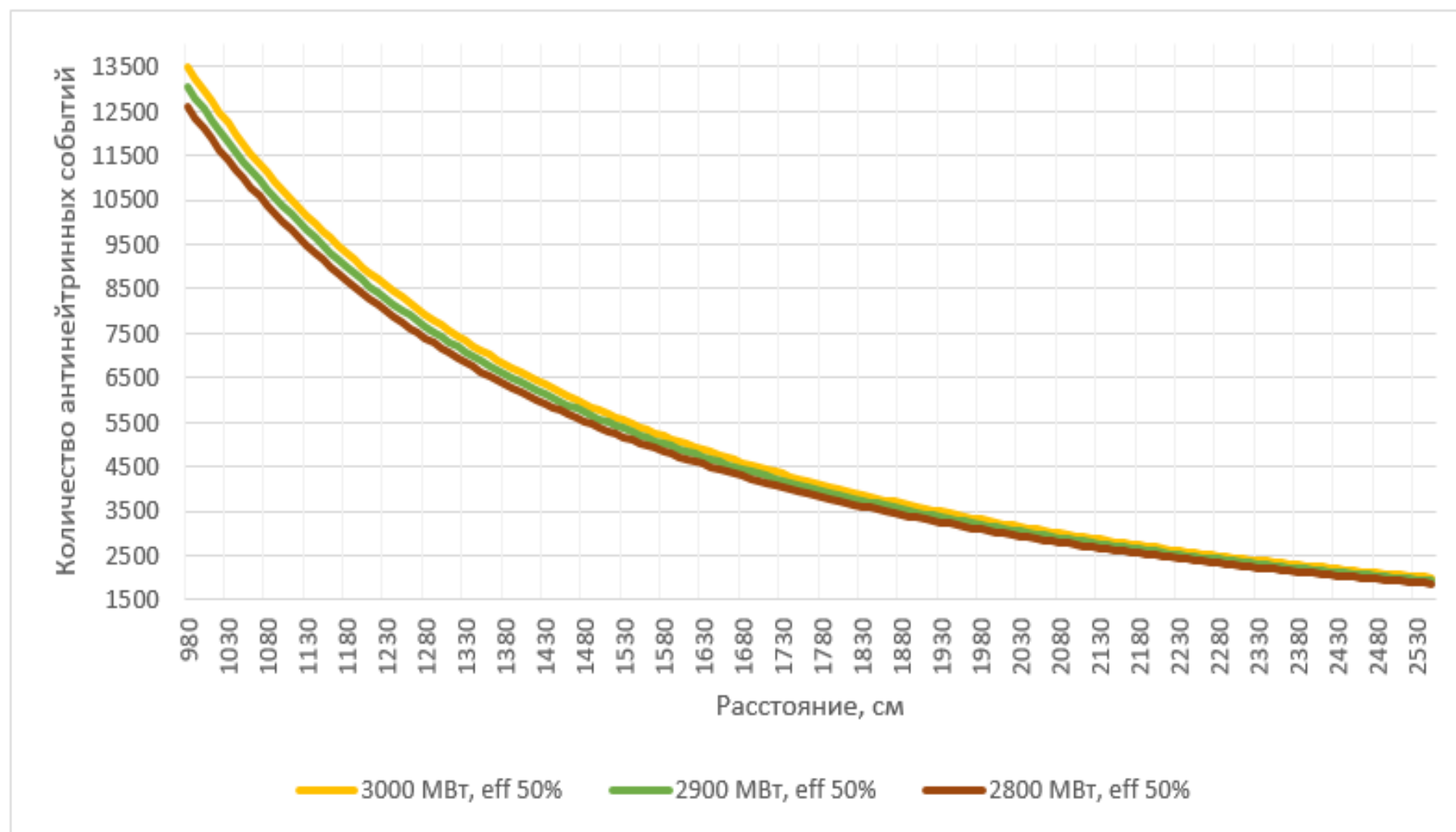


Рис. 8 Характерный вид скорости счета за 1 сутки в зависимости от расстояния между центром детектора и центром реактора для разных тепловых мощностей, на которых работает реактор (МВт)

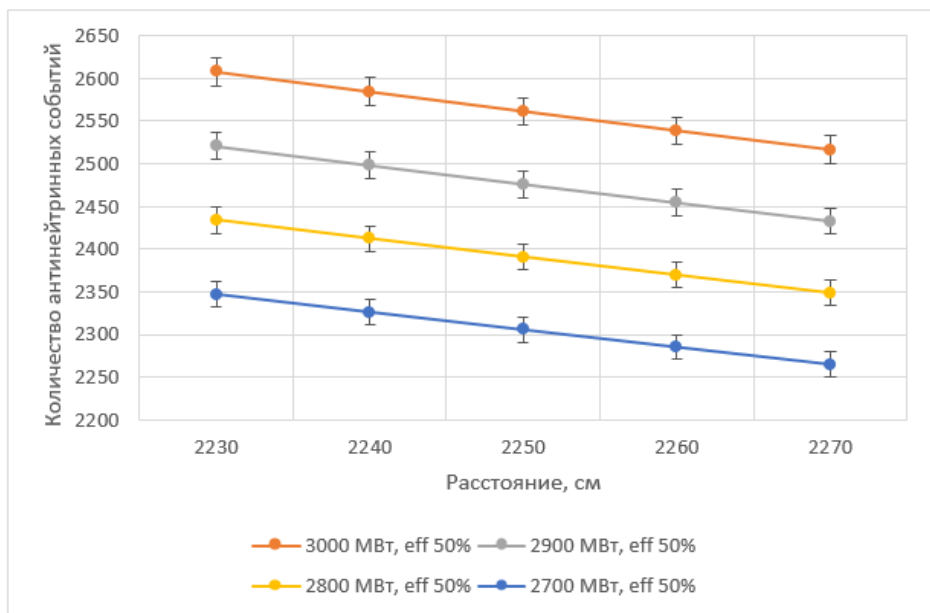


Рис. 9 Скорость счета за сутки для разных тепловых мощностей на расстоянии 2250 ± 20 см

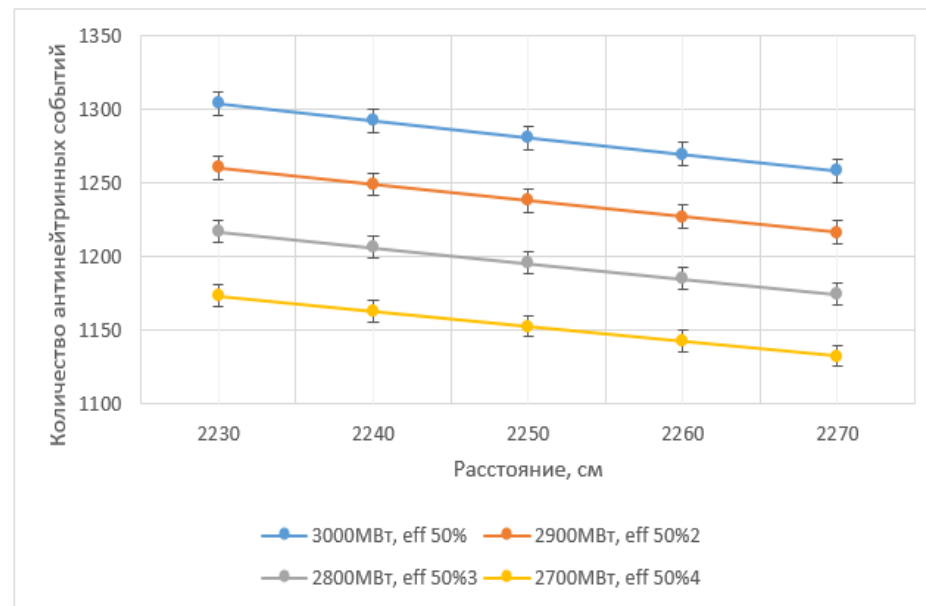


Рис. 10 Скорость счета за 12 часов для разных тепловых мощностей на расстоянии 2250 ± 20 см

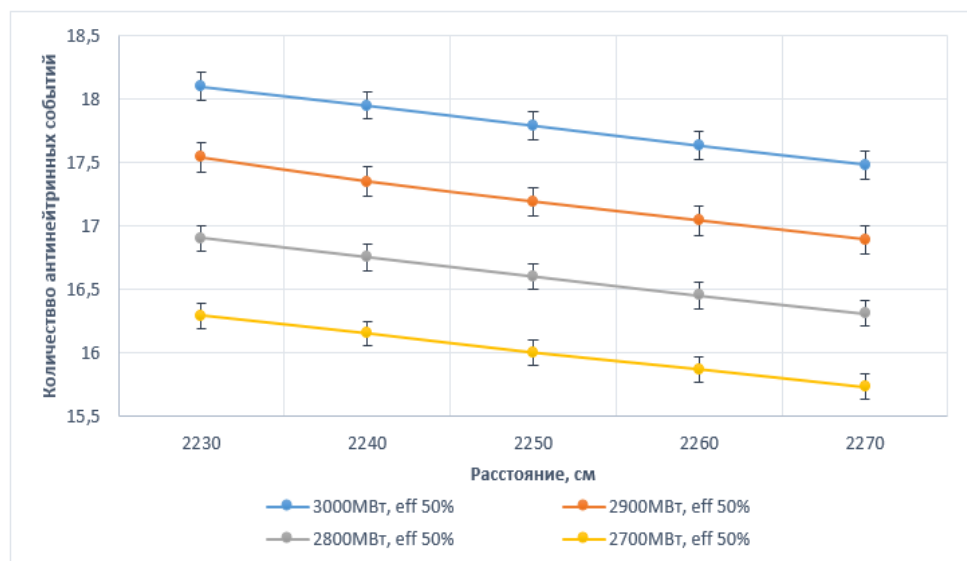


Рис. 11 Скорость счета за для разных тепловых мощностей на расстоянии 2250 ± 20 см (10 минут)

СРАВНЕНИЕ С ДРУГИМИ ЭКСПЕРИМЕНТАМИ

| Название эксперимента | Тепловая мощность, МВт | База, м | $N_{вз}$ | $N_{собр}/сут.$ |
|-----------------------|------------------------|---------|----------|----------------------------------|
| iDREAM | 3000 | 20 | 6483 | 3241* ($\epsilon = 50\%$) |
| | | 22.5 | 5122 | 2561* ($\epsilon = 50\%$) |
| | | 25 | 4149 | 2074* ($\epsilon = 50\%$) |
| DANSS | 3000 | 10.7 | 22378 | 4923 ($\epsilon \approx 22\%$) |
| Daya Bay | 3000 | ~500 | 306906 | 664 |
| | | ~1800 | 40825 | 281 |
| NEOS | 2800 | 23.7 | 3856 | 1885 |
| RENO | 2730 | 300 | 5000 | 100 |
| PROSPECT | 85 | 7 ÷ 9 | 24608 | 750 |
| Nucifer | 70 | 7.2 | | 281 |
| Stereo | 53.8 | 10.3 | | 400 |
| Double CHOOZ | 4250 | 275 | | 600 |
| | | 1050 | | 10 |

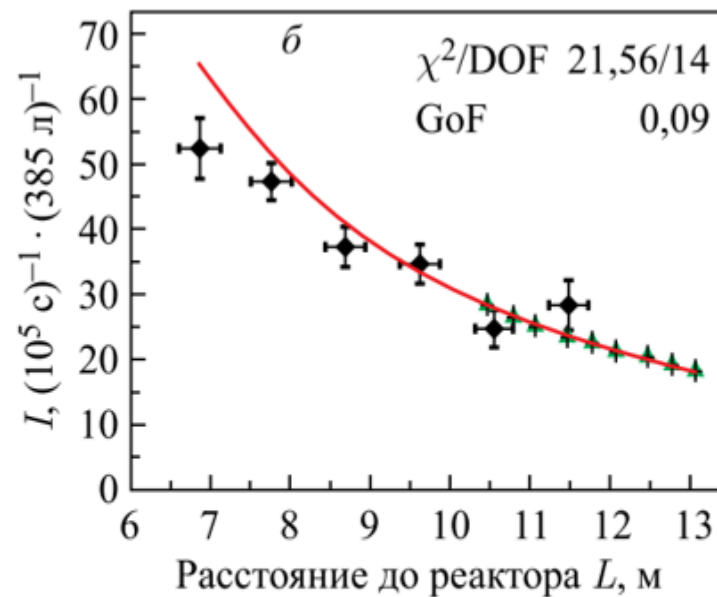


Рис. 12 Результаты объединения экспериментальных данных «Нейтрино-4» и DANSS для фитирования функцией A/L^2 , усредненные в диапазоне 1 м. [8]

ВЫВОДЫ

- ⦿ Детектор iDREAM находится на завершающей стадии сборки
- ⦿ Расчетная скорость счета порядка 2500-2600 событий в сутки после вычета фона
- ⦿ Возможность фиксации остановки и запуска реактора в течение нескольких часов
- ⦿ Возможность воспроизведения динамики работы реактора в режиме online

ССЫЛКИ

- ◉ [1] Физика реактора, 00.УЦ.РО.Пс.477
- ◉ [2] Физика реакторных антинейтрино / В.Д. Русов, В.А. Тарасов, Д.А. Литвинов // М.: Издательство ЛКИ, 2008. 408 с.
- ◉ [3] Измерения в потоке антинейтрино ровенской АЭС на спектрометре РОНС / А.И. Афонин, А.Г. Вершинский, С.В. Егоров, Ю.В. Климов, В.И. Копейкин, А.А. Лабзов, Л.А. Микаэлян, К.В. Озеров, В.В. Синев // ИАЭ-4746/2 УДК 539.12
- ◉ [4] Improved Predictions of Reactor Antineutrino Spectra / Mueller, Th. A. et al., // Phys. Rev. C83 (2011) 054615 arXiv:1101.2663 [hep-ex] IRFU-10-280.
- ◉ [5] <https://www.quantumdiaries.org/2011/11/09/first-double-chooz-neutrino-oscillation-result/>
- ◉ [6] Промышленный детектор iDREAM для мониторинга режимов работы атомных реакторов нейтринным методом / М.Б. Громов, Г.А. Лукьянченко, Д.С. Марков и др. // Вестник МГУ. Физика. Астрономия. - 2015
- ◉ [7] СТРОИТЕЛЬСТВО АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ: Учебник для вузов / В.Б. Дубровский, П.А. Лавданский, И.А. Енговатов // М. : Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010. - 368 с. - ISBN 978-5-93093-431-2.
- ◉ [8] The first observation of effect of oscillation in Neutrino-4 experiment on search for sterile neutrino (continuation) / A.P. Serebrov et al. // arXiv:1809.10561 [hep-ex] doi:10.1134/s0021364019040040

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ