
ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОСТИ ИСКУССТВЕННОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРИНО В ЭКСПЕРИМЕНТЕ BEST КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ.

Е. П. Веретенкин, В. Н. Гаврин, Т. В. Ибрагимова, Ю. П. Козлова

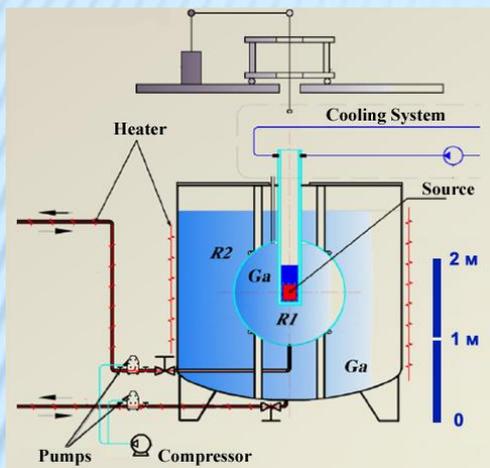
Институт ядерных исследований РАН



**Вход в
тоннель**

**Поселок
Нейтрино**

БАКСАНСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ПОИСКУ СТЕРИЛЬНЫХ НЕЙТРИНО (BEST)



Двухзонный Ga детектор

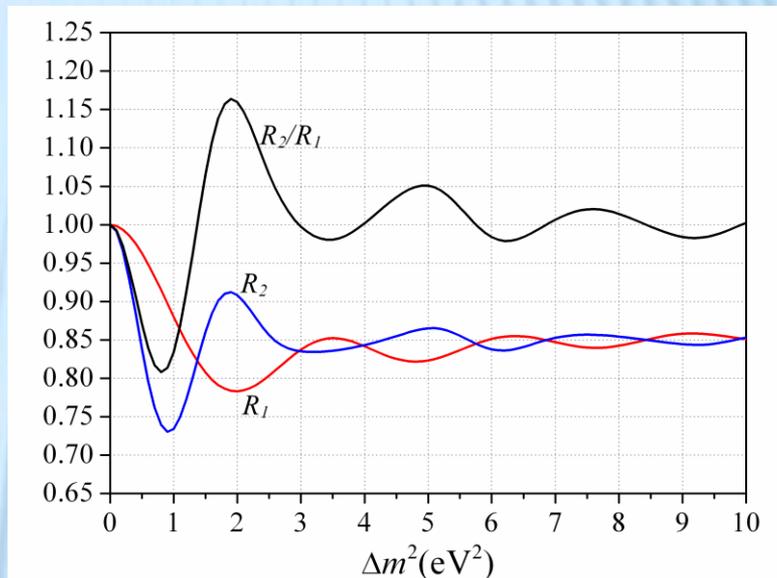
Внутренняя сферическая зона: 7,40 т Ga,

Внешняя цилиндрическая зона: 40,09 т Ga,

Длина пробега нейтрино в сфере: 53 см,

Длина пробега нейтрино в цилиндре: 55 см.

$$P_{ee} = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \Delta m^2 (\text{eV}^2) \frac{L(\text{m})}{E(\text{MeV})} \right)$$

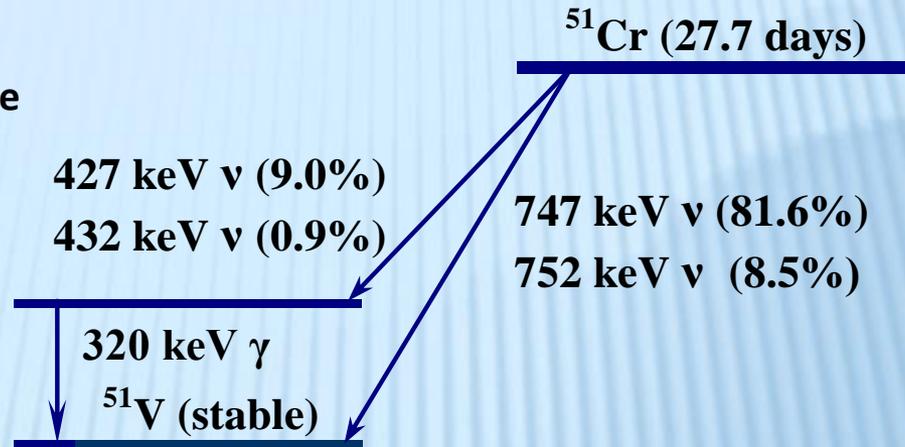
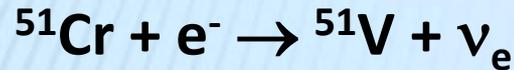


Отношение скорости захвата при наличии осцилляций к предсказанной в их отсутствие во внутренней (R_1) и внешней (R_2) зонах и их отношение R_2/R_1 как функция Δm^2 для случая $\sin^2 2\theta = 0.3$.

Доказательства осцилляций в стерильное состояние:

- значительная разница скорости захвата в двух зонах
- средняя скорость захвата в обеих зонах существенно ниже ожидаемой

СХЕМА РАСПАДА ^{51}Cr



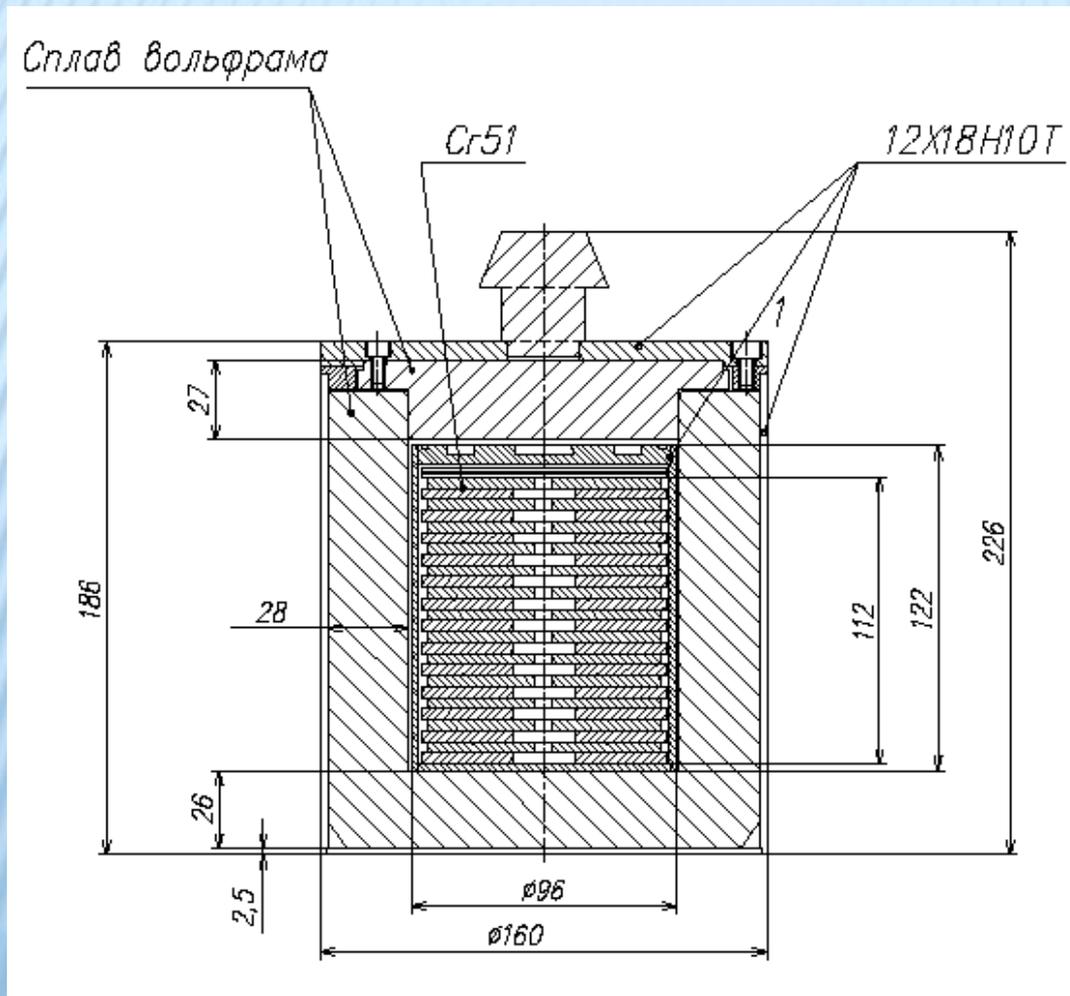
Энерговыделение – 36.750 ± 0.084 кэВ/распад или 217,857 Вт/МКи.

Регистрация нейтрино галлиевым детектором



1. Экспозиция Ga мишени.
2. Химическое извлечение ^{71}Ge .
3. Счет распадов ^{71}Ge .

ИСТОЧНИК НЕЙТРИНО НА ОСНОВЕ ^{51}Cr



4 кг ^{50}Cr 97%-обогащения,
хромовые диски $h = 4$ мм,
Ø 84 и 88 (мм) по 13 шт.

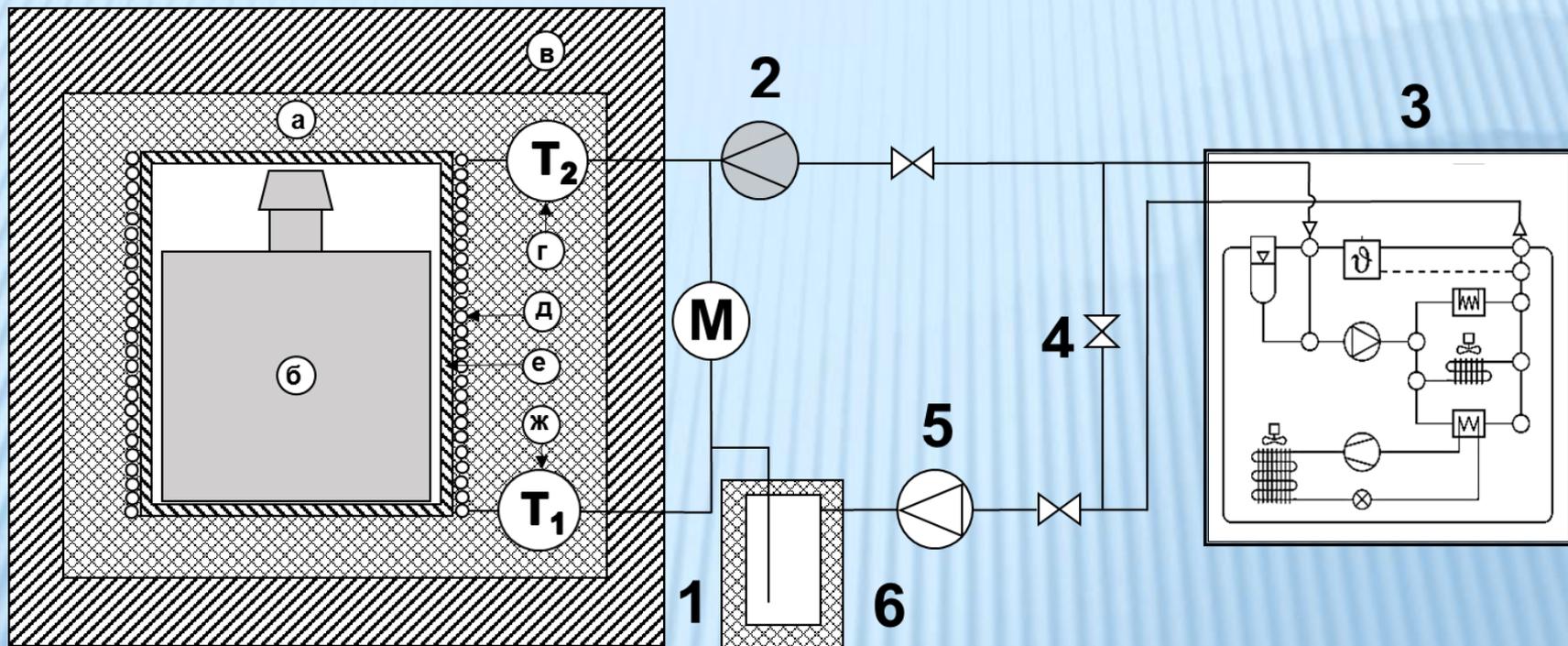
Биологическая защита из
сплава ВМ 2-1
толщиной ~ 30 мм.

Потери за счет выхода
 γ -квантов за пределы
измерительной ячейки
 $\sim 0.03\%$.

Калориметрическая система должна удовлетворять следующим основным требованиям:

- 1. Пределы измерений (50-650 Вт). 0,2 – 3,5 МКи**
- 2. Время, необходимое для измерения часов. не более 20**
- 3. Ошибка измерения не более 1%.**

СХЕМА КАЛОРИМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ



1 - ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЯЧЕЙКА

а - теплоизоляция

б - источник нейтрино

в - биологическая защита

г - выходное термосопротивление

д - теплообменник

е - контейнер

ж - входное термосопротивление

2 – РАСХОДОМЕР

3 - ТЕРМОСТАТ

4 - БАЙПАС

5 - ШЕСТЕРЕНЧАТЫЙ НАСОС

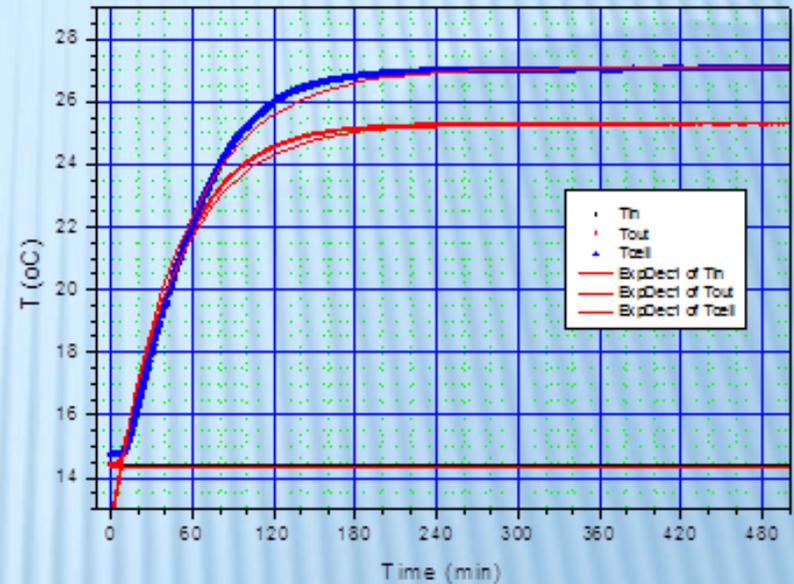
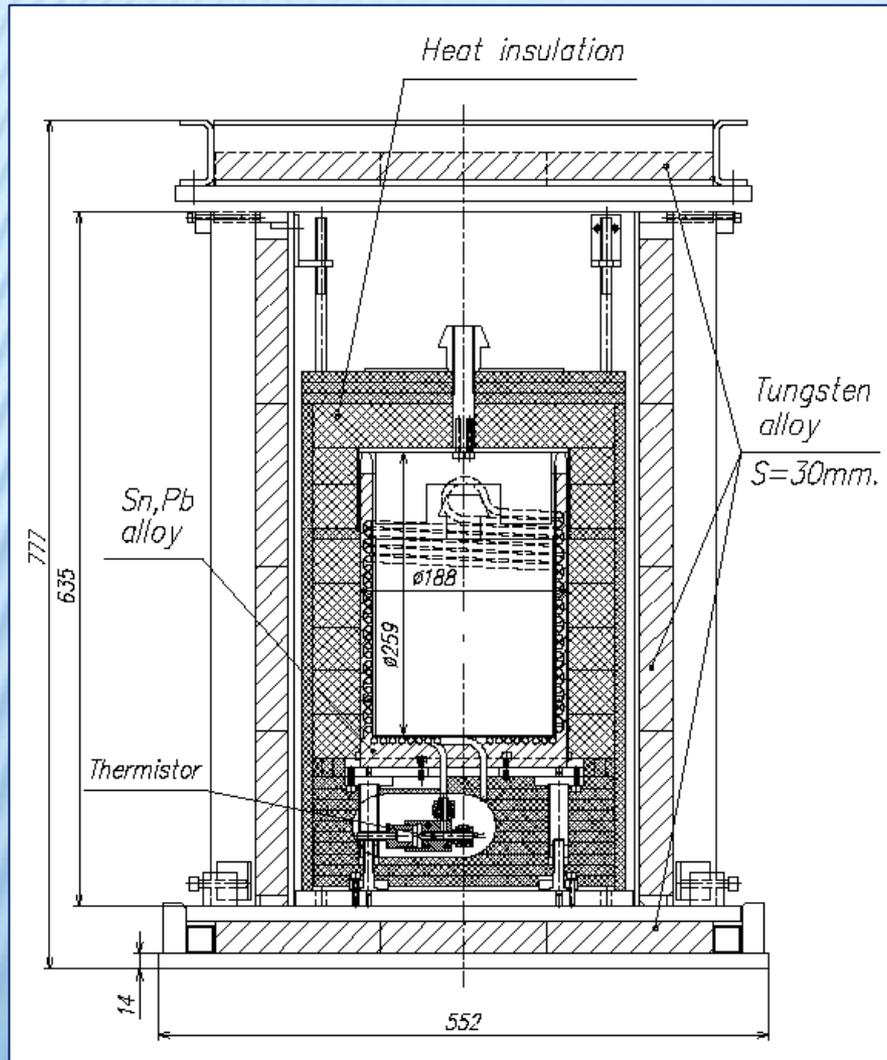
6 – ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ДЕМПФЕР

М – ДИФ. МАНОМЕТР

При проведении измерений необходимо учитывать:

1. Возможность дополнительного тепловыделения за счет примесных радионуклидов в источнике и тепловыделения за счет трения жидкости при протекании через теплообменник.
2. Теплопотери в окружающую среду.
3. Изменение тепловыделения в результате распада ^{51}Cr .

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЯЧЕЙКА КАЛОРИМЕТРА



$$T = T_1 \cdot \exp(-x/t_1) + T_0$$

$$T_{in}: t_1 = 51 \text{ min}$$

$$T_{out}: t_1 = 47 \text{ min}$$

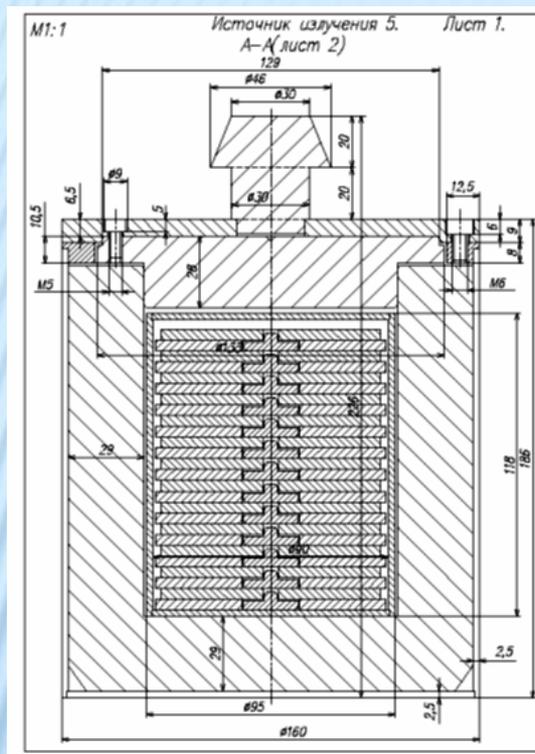
$$T_{cont}: t_1 = 53 \text{ min}$$

РАДИОНУКЛИДНЫЙ СОСТАВ ИСТОЧНИКА НЕЙТРИНО

	Изотоп	Энергия в линии, кэВ	Выход линии, %	n_s	n_f	Активность на 5.07.2019, мКи	W, мВт
1	^{137}Cs	662	85	229	1268	$8.5 \times (1 \pm 0.23)$	0.06
2	^{95}Zr	724	11.1	356	768	$60 \times (1 \pm 0.12)$	2.1
		757	54.38	334	748		
3	^{95}Nb	766	99.8	1313	682	$87 \times (1 \pm 0.04)$	
4	^{134}Cs	796	85.5	217	626	$3.3 \times (1 \pm 0.18)$	0.041
5	^{58}Co	811	99.44	141	632	$6.0 \times (1 \pm 0.27)$	0.08
6	^{54}Mn	835	100	963	570	$13 \times (1 \pm 0.05)$	0.10
7	^{46}Sc	889	100	254	569	$5.2 \times (1 \pm 0.10)$	0.07
		1120	100	346	400		
8	^{59}Fe	1099	57	403	401	$23 \times (1 \pm 0.07)$	0.22
		1291	43.2	383	97		
9	^{60}Co	1173	100	1863	286	$6.6 \times (1 \pm 0.03)$	0.11
		1332	100	2300	85		
10	^{124}Sb	1690	47.5	341	16	$5.8 \times (1 \pm 0.06)$	0.10
		2091	5.5	49	3		
11	^{22}Na	1274	99.9	88	114	$0.3 \times (1 \pm 0.20)$	0.005
12	$^{154}\text{Eu} (?)$	1595	1.8	13	13	$1.4 \times (1 \pm 0.48)$	0.017
Σ							3.0

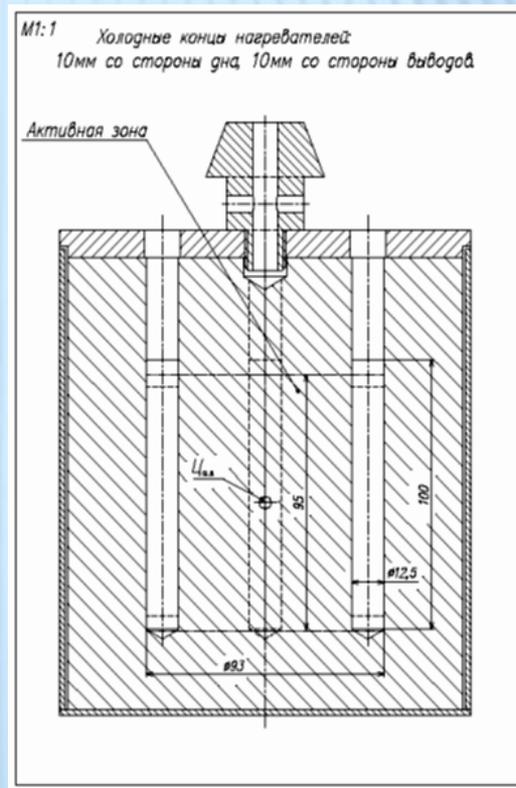
- Суммарное тепловыделение примесных радиоактивных элементов в источнике составляет 3.0 ± 0.5 мВт.
- Доля радиоактивных примесей в тепловыделении источника ^{51}Cr активностью 3.0 МКи с тепловыделением около 650 Вт составляет порядка $5 \cdot 10^{-6}$.

КАЛИБРОВКА КАЛОРИМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ



Источник нейтрино на основе ^{51}Cr

- Теплоемкость - 9862 Дж/К
- Теплопроводность вольфрамового сплава - 163 Вт/м·К



Тепловой имитатор источника

- Теплоемкость - 10031 Дж/К
- Теплопроводность дюралюминия - 160 Вт/м·К

В проточном лабиринтном калориметре обеспечивается полный отвод теплоносителем значительного количества тепла ~ 600 Вт.

При этом при постоянном расходе разность температуры теплоносителя на выходе и на входе в калориметр прямо пропорциональна тепловыделению:

$$N = kQ(T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}})$$

где:

N – тепловыделение источника, Вт;

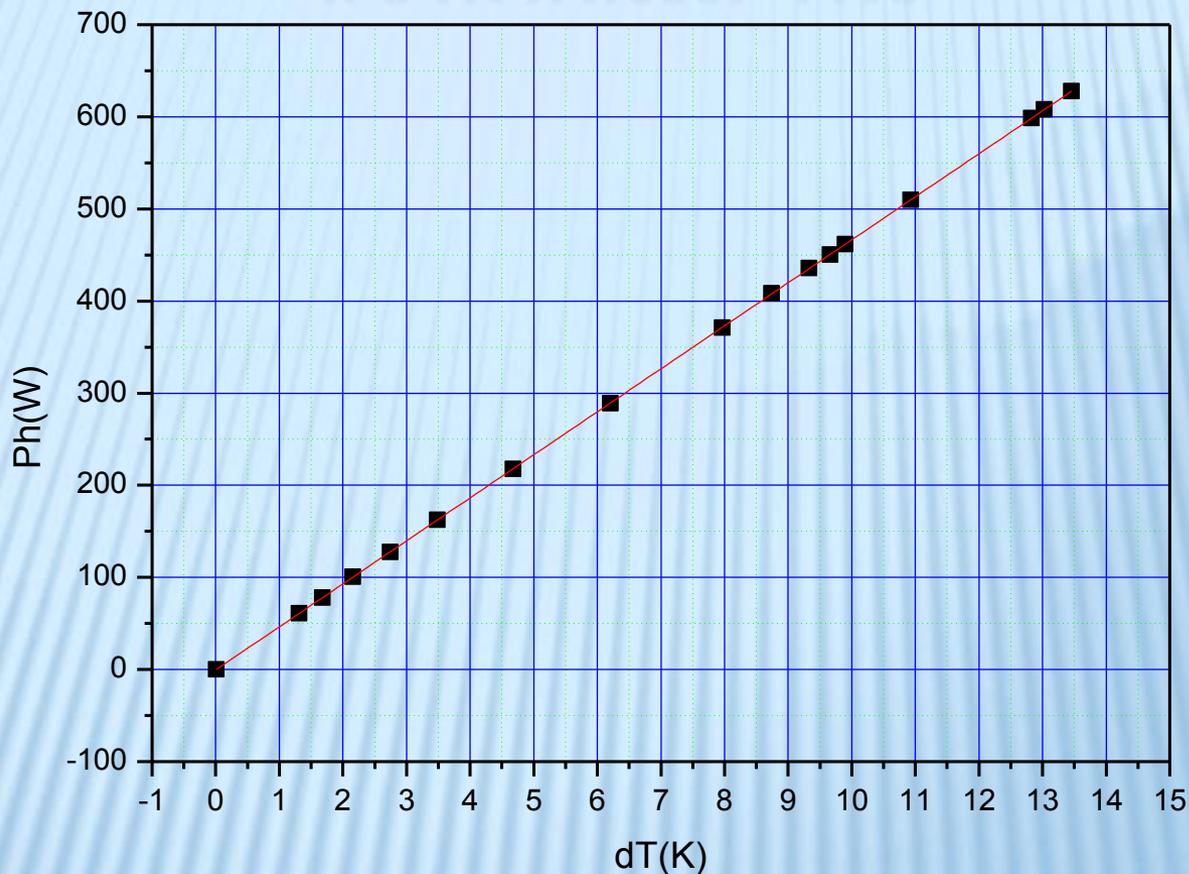
k – коэффициент пропорциональности, который в случае отсутствия тепловых потерь равен удельной теплоемкости теплоносителя, Дж/(кг·К);

Q – расход теплоносителя, кг/сек;

$T_{\text{вых}}$ – температура на выходе из калориметра, К;

$T_{\text{вх}}$ – температура на входе в калориметр, К.

КАЛИБРОВКА КАЛОРИМЕТРА



$$N(dT) = (46,69 \pm 0,02) \times dT + (-0,41 \pm 0,15)$$

Коэффициент корреляции: $R^2 = 1$

$$N = c_p Q dT, c_p = 4202,0 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К},$$

$$c_p^{\text{табл}} = 4180,2 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К} [\text{J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 31, No. 2, 2002, 387-535}]$$

КАЛИБРОВКА КАЛОРИМЕТРА В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

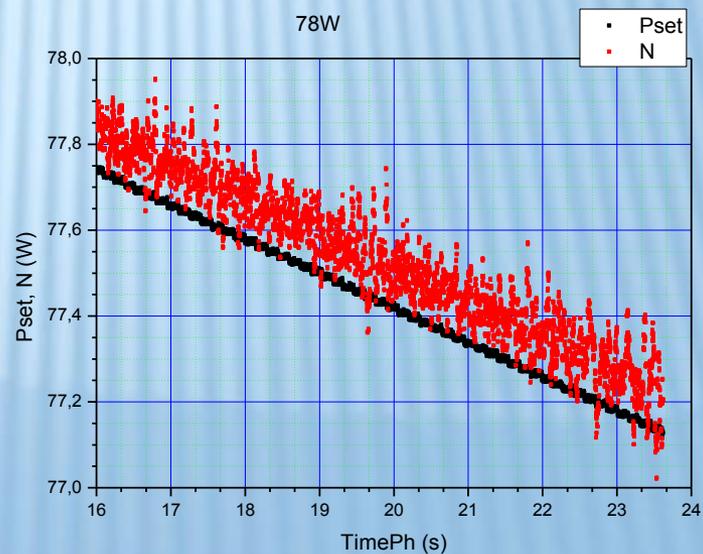
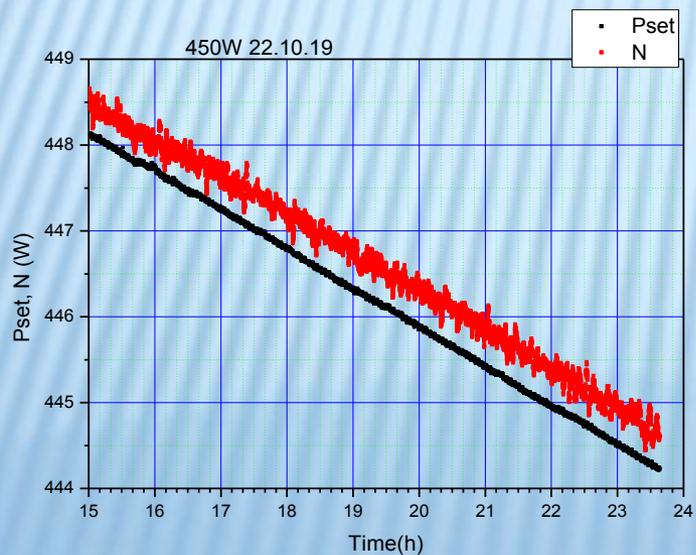
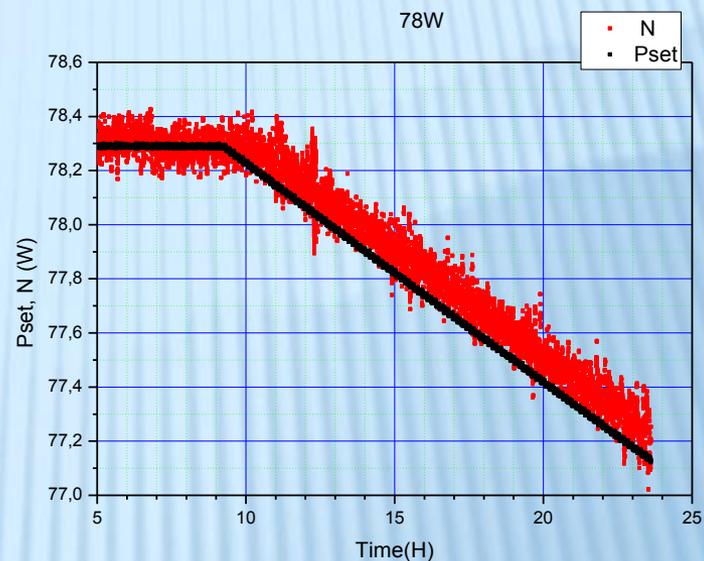
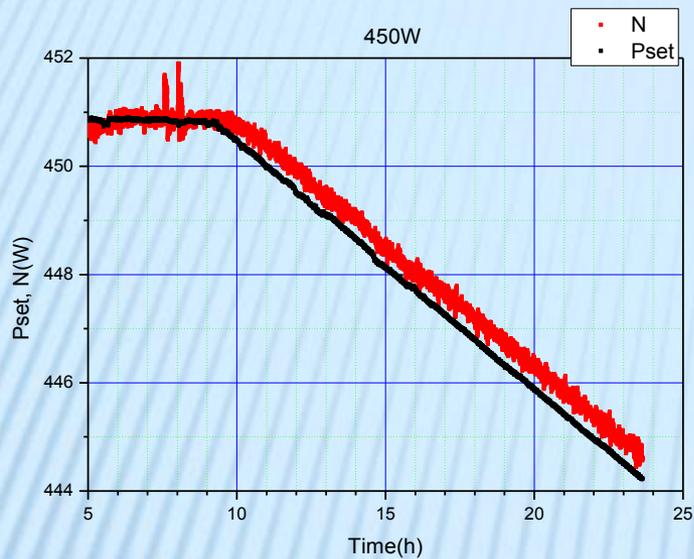
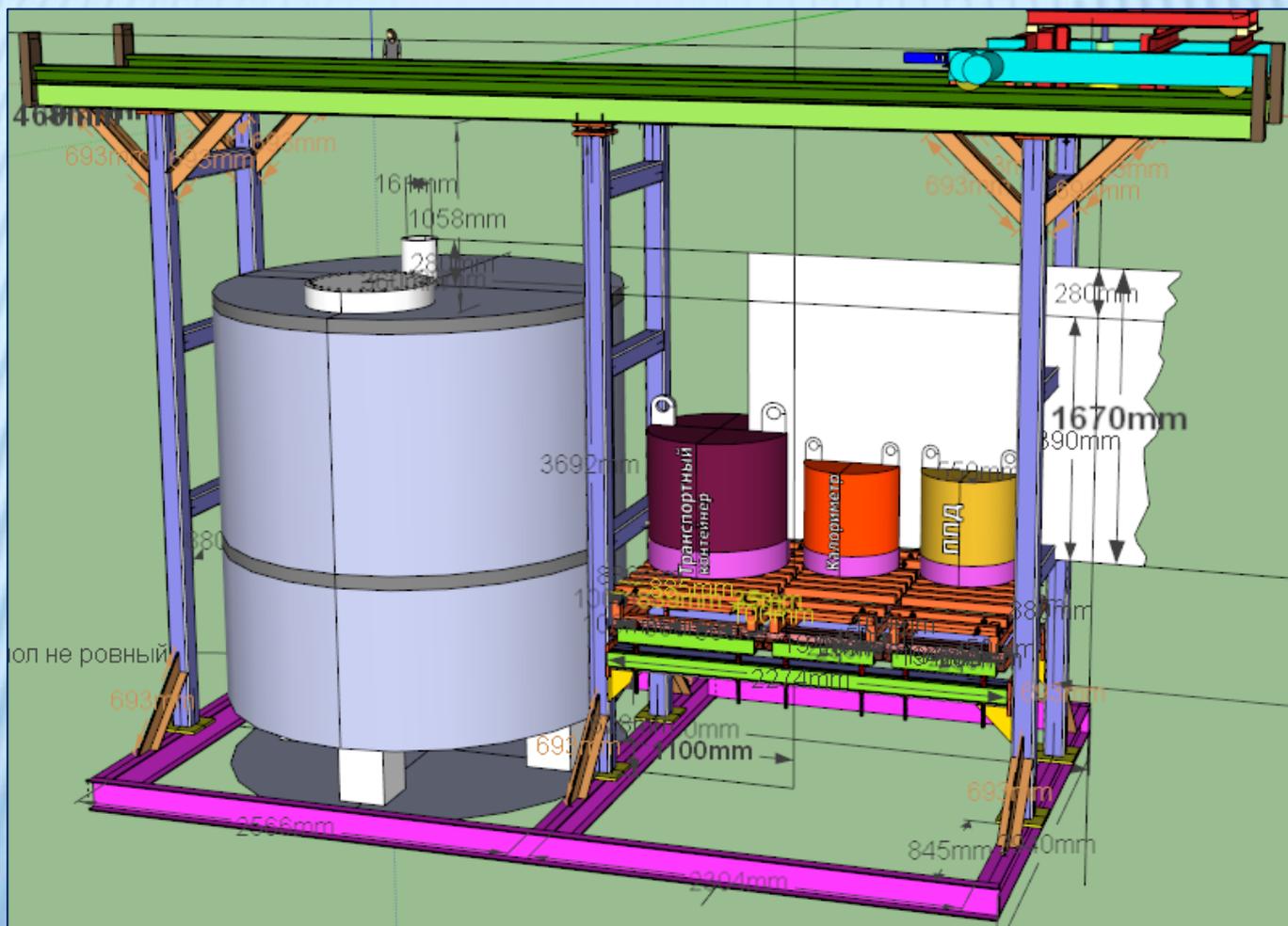


СХЕМА УСТАНОВКИ БЭСТ



УСТАНОВКА БЭСТ



ПЕРЕНОС ИСТОЧНИКА МАНИПУЛЯТОРОМ



ПЕРЕНОС ИСТОЧНИКА МАНИПУЛЯТОРОМ



ВРЕМЕННОЙ ГРАФИК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА БЭСТ

№		Начало	Окончание	Продолжительность, сутки
1	Экспозиция	5.07.19	15.07.19	10
	Измерение	15.07.19	16.07.19	1
2	Экспозиция	16.07.19	25.07.19	9
	Измерение	25.07.19	26.07.19	1
3	Экспозиция	26.07.19	04.08.19	9
	Измерение	04.08.19	05.08.19	1
4	Экспозиция	05.08.19	14.08.19	9
	Измерение	14.08.19	15.08.19	1
5	Экспозиция	15.08.19	24.08.19	9
	Измерение	24.08.19	25.08.19	1
6	Экспозиция	25.08.19	03.09.19	9
	Измерение	03.09.19	04.09.19	1
7	Экспозиция	04.09.19	13.09.19	9
	Измерение	13.09.19	14.09.19	1
8	Экспозиция	14.09.19	23.09.19	9
	Измерение	23.09.19	24.09.19	1
9	Экспозиция	24.09.19	03.10.19	9
	Измерение	03.10.19	04.10.19	1
10	Экспозиция	04.10.19	13.10.19	9
	Измерение	13.10.19	14.10.19	1

Было проведено 10 измерений активности источника нейтрино.

Результаты измерений обрабатывались тремя методами:

1. По калибровочной зависимости: $A = [kQ(T_{\text{ВЫХ}} - T_{\text{ВХ}})/f]$.
2. По калибровке в условиях, максимально приближенным к условиям конкретного измерения: $A = [k_i Q(T_{\text{ВЫХ}} - T_{\text{ВХ}})/f]$.
3. Расчетным методом по формуле:

$$A = [Qc_p(T_{\text{ВЫХ}} - T_{\text{ВХ}}) + k_1(T_{\text{КОНТ}} - T_{\text{КОМН}}) - 1,76 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta p \cdot Q/\rho]/f,$$

где A – активность источника, МКи,

k – коэффициент калибровочной зависимости, Дж/кг·К,

Q – расход теплоносителя, кг/час,

$T_{\text{ВЫХ}}$ – выходная температура теплоносителя, К,

$T_{\text{ВХ}}$ – входная температура теплоносителя, К,

f – коэффициент пересчета тепловыделения в активность, Вт/МКи,

k_i – коэффициент калибровочной зависимости i -го измерения, Дж/кг·К,

c_p – теплоемкость теплоносителя, Дж/кг·К,

k_1 – коэффициент теплотерь в окружающую среду, Вт/К,

$T_{\text{КОНТ}}$ – температуры стенки контейнера, К,

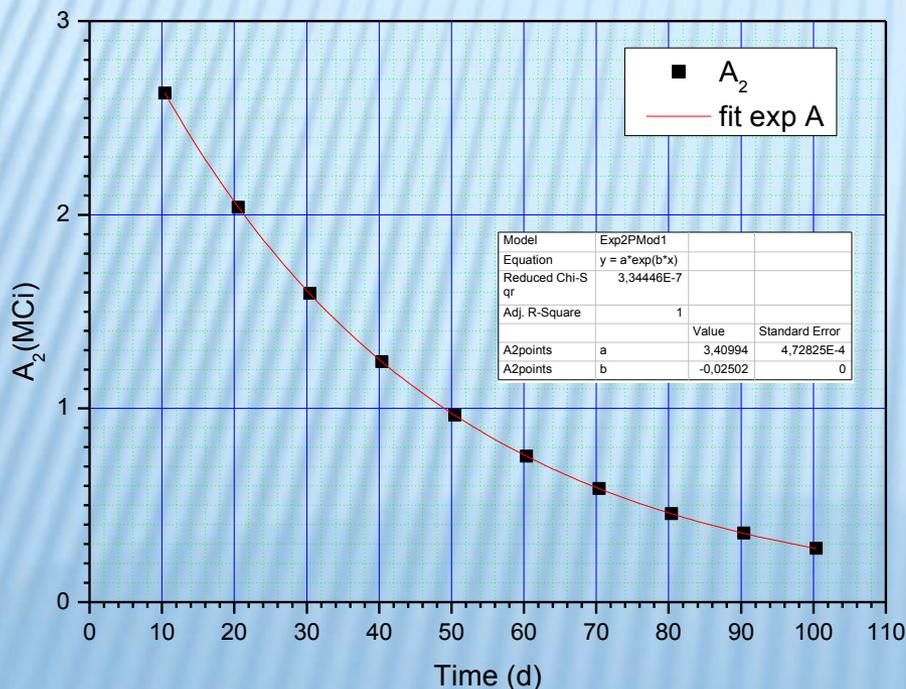
$T_{\text{КОМН}}$ – температура окружающей среды, К,

Δp – гидравлическое сопротивление теплообменника калориметра, мбар,

ρ – плотность теплоносителя, кг/м³.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ АКТИВНОСТИ ИСТОЧНИКА НЕЙТРИНО

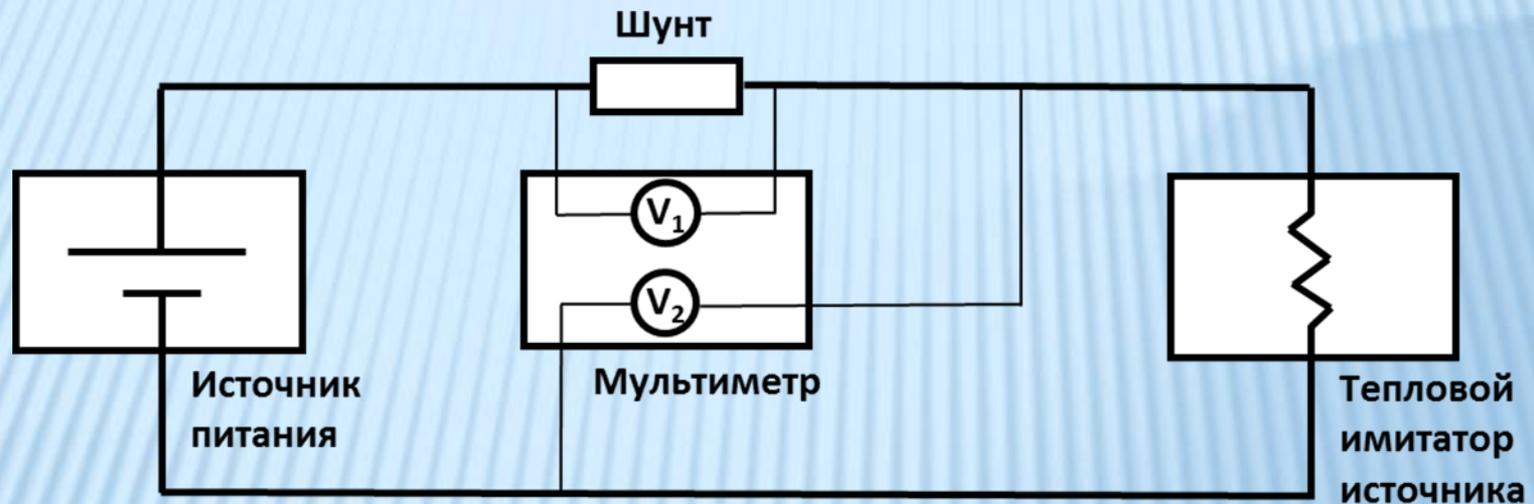
Метод\Номер измерения,	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	A, МКи
1	2,6282	2.0404	1.5954	1.2442	0.9667	0.7539	0.5863	0.4556	0.3546	0.2758	3,4125
2	2.6279	2.0382	1.5938	1.2420	0.9652	0.7532	0.5857	0,4556	0.3559	0.2770	3,4099
3	2.6403	2.0416	1,5994	1,2390	0,9650	0,7553	0,5874	0,4577	0,3561	0,2773	3,4031
											3,4085 ±0,0048



Активность источника с учетом неопределенности тепловыделения (0,14%) и энергосвыделения (0,23%) составила на 05.07.2019г.

3,4085 ± 0,0092 МКи

СХЕМА ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНОСТИ ИМИТАТОРА ИСТОЧНИКА



$$N = \frac{U_1 U_2}{R_{\text{шунт}}}, \quad \delta = 0,03\%$$

КАЛОРИМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Измерительная ячейка с источником нейтрино



Измеритель температуры

Расходомер

Манометр

Источник питания
Вольтметр
Управляющий ПК



Температурный демпфер

Термостат

ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ КАЛОРИМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

1. Платиновые термометры сопротивления ПТСВ-2-1 (производства ВНИИФТРИ) с погрешностью измерения температуры не более $0,002^{\circ}\text{K}$.
2. Многоканальный прецизионный измеритель МИТ 8.
3. Кориолисовый массовый расходомер Micro Motion с ошибкой измерения $\pm 0.05\%$.
4. Охлаждающий термостат Unistat с точностью поддержания температуры теплоносителя $\pm 0,01^{\circ}\text{K}$.
5. Шестеренчатый насос Ismatec Reglo-Z Digital с точностью поддержания расхода теплоносителя $\pm 0,05\%$.
6. Программируемый источник питания постоянного тока Sorensen XHR 300-3,5.
7. 10-канальный универсальный вольтметр В7-78/1 с погрешностью измерения напряжения не более $0,01\text{ В}$.
8. Измерительный шунт ИШМ (калибровка ВНИИФТРИ) с сопротивлением $52,14 \pm 0,01\text{ Ом}$.

Программное обеспечение калориметрической

системы. Программное обеспечение разрабатывалось на основе пакета LabVIEW фирмы National Instruments.

Программное обеспечение осуществляет автоматическое считывание и сохранение данных

- расхода, плотности, массы и температуры теплоносителя, проходящего через расходомер;
- входной и выходной температур теплоносителя, проходящего через имитатор источника;
- напряжения на нагревателе и на токовом шунте, определяющих подаваемую мощность.