

КАЛОРИМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АКТИВНОСТИ ИСТОЧНИКА НЕЙТРИНО НА ОСНОВЕ ^{51}Cr

Ю. П. Козлова*, Е. П. Веретенкин, В. Н. Гаврин, О. В. Грехов,
Т. В. Ибрагимова, А. В. Калихов, А. А. Мартынов

Институт ядерных исследований РАН, Москва

В рамках проекта эксперимента BEST создана калориметрическая система для измерения активности высокоинтенсивных (несколько мегаюри) источников нейтрино на основе ^{51}Cr . В интервале тепловых мощностей 250–520 Вт неопределенность измерения тепловыделения составила менее 0,25%. С учетом величины неопределенности значения энерговыделения при распаде ^{51}Cr (0,23%) активность источника нейтрино может быть определена с точностью $\sim 0,5\%$.

Within the framework of the BEST experiment project, a calorimetric system was developed to measure the activity of high-intensity (several MCI) neutrino sources based on ^{51}Cr . In the range of thermal capacities of 250–520 W, the uncertainty of the heat release measurement is less than 0.25%. Taking into account the uncertainty of the energy release value for the ^{51}Cr decay (0.23%), the activity of the neutrino source can be determined with an accuracy of $\sim 0.5\%$.

PACS: 95.55.Vj

ВВЕДЕНИЕ

Впервые искусственные источники нейтрино на основе ^{51}Cr и ^{37}Ar были использованы для калибровки телескопов солнечных нейтрино в экспериментах SAGE (^{51}Cr [1] и ^{37}Ar [2]) и GALLEX (дважды ^{51}Cr [3, 4]). Средневзвешенное значение отношения измеренной в этих экспериментах скорости захвата нейтрино к теоретически ожидаемой составило $R = 0,87 \pm 0,50$, т. е. более чем на два стандартных отклонения меньше единицы, что получило название галлиевой аномалии [5]. Галлиевая аномалия может быть объяснена введением осцилляций электронных нейтрино в стерильное состояние на очень коротких расстояниях с Δm^2 порядка 1 эВ² [6]. Для экспериментальной проверки этой гипотезы был предложен эксперимент BEST [7],

*E-mail: julia@inr.ru

одной из задач которого является создание калориметрической системы для высокоточного (с неопределенностью $\leq 1\%$) измерения активности искусственного источника нейтрино на основе ^{51}Cr с первоначальной активностью более 3 МКи. Тепловыделение такого источника после облучения в атомном реакторе составит около 650 Вт [8]. Для сравнения тепловыделение источника, использованного в эксперименте SAGE, составляло ~ 90 Вт и измерялось системой на основе калориметра Кальве с точностью 1,2% [1]. Параллельно с калориметрическим методом активность источника в эксперименте BEST будет определяться по спектрам рентгеновского тормозного излучения от источника с использованием германиевого полупроводникового детектора [9].

1. КАЛОРИМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АКТИВНОСТИ ИСТОЧНИКА НЕЙТРИНО

1.1. Основные факторы, определяющие точность измерения активности. Радиоактивный изотоп ^{51}Cr распадается с захватом электрона с внутренних оболочек на основное состояние ^{51}V (90%) и на возбужденное состояние ^{51}V (10%), при этом возбуждение снимается испусканием гамма-кванта с энергией 320 кэВ, поглощение которого вносит основной вклад в тепловыделение. Согласно уточненным данным [10], среднее значение энергосвечения составляет $(36,750 \pm 0,084)$ кэВ/распад с неопределенностью 0,23%.

Помимо ^{51}Cr вклад в тепловыделение могут вносить другие радионуклиды, наработанные при облучении хрома в атомном реакторе. В калибровочном эксперименте SAGE в источнике ^{51}Cr были детектированы радионуклиды ^{46}Sc , ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{182}Ta . Расчеты показывают [8], что даже при составе, аналогичном первому источнику, вклад примесных радионуклидов в новом источнике составит 0,02% сразу после облучения, т. е. будет являться пренебрежимо малым, и 0,11% в конце измерений, когда примесный состав будет известен из результатов гамма-спектрометрических измерений и может быть корректно учтен. В эксперименте BEST концентрация примесей значительно уменьшится вследствие применения современных способов получения металлического хрома и вклад примесных нуклидов в тепловыделение снизится. Часть энергии от распада ^{51}Cr , уносимая гамма-квантами за пределы измерительной ячейки, согласно расчетам, составляет 0,03%.

Таким образом, основной вклад в неопределенность измерения активности источника вносит ошибка измерения тепловыделения, которую необходимо снизить до уровня неопределенности энергосвечения, при этом точность определения активности источника составит около 0,5%.

1.2. Лабиринтный калориметр проточного типа. Для измерения тепловыделения источника в диапазоне тепловых мощностей 50–700 Вт был вы-

бран лабиринтный калориметр проточного типа, в котором при установлении теплового равновесия все выделяемое источником тепло передается теплоносителю. Гидравлическая схема калориметра показана на рис. 1.

Источник *б* помещается в контейнер *д* измерительной ячейки *1*. Контейнер окружен лабиринтным теплообменником *з*. Для предотвращения тепловых потерь контейнер с теплообменником окружен теплоизоляцией *а*, которая, в свою очередь, окружена биологической защитой *в*, необходимой при работе с радиоактивным источником. В качестве теплоносителя используется деионизованная вода. Входная и выходная температуры теплоносителя измеряются платиновыми термометрами сопротивления ПТСВ-2-1 (производства ВНИИФТРИ) с погрешностью измерения температуры не более 0,002 К. Стабилизация входной температуры теплоносителя осуществляется термостатом Unistat с точностью поддержания температуры теплоносителя $\pm 0,01$ К. Шестеренчатый насос Ismatec Reglo-Z Digital с точностью поддержания расхода теплоносителя $\pm 0,05$ % обеспечивает стабилизацию расхода теплоносителя, который измеряется кориолисовым массовым расходомером Micro Motion с ошибкой измерения $\pm 0,05$ %. С помощью манометра определяется давление теплоносителя для вычисления гидродинамического вклада в тепловыделение.

Для измерения метрологических характеристик прототипа калориметра был изготовлен тепловой имитатор источника с электронагревом. Геометрия имитатора соответствовала геометрии реального источника нейтрино. На рис. 2 показана электрическая схема измерения подаваемой мощности,

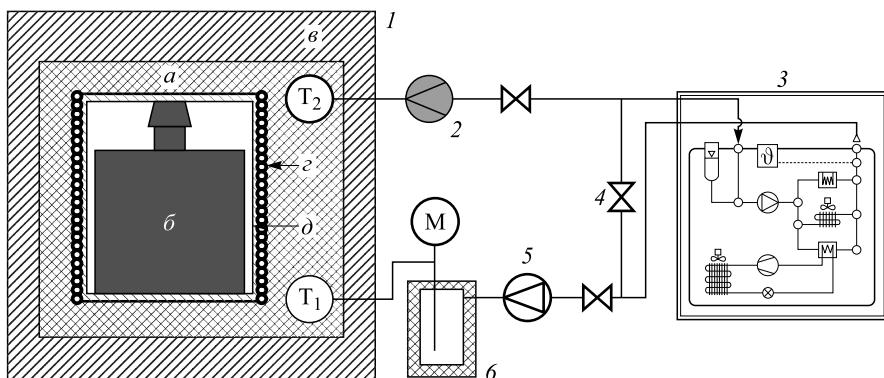


Рис. 1. Гидравлическая схема калориметра проточного типа. *1* — измерительная ячейка: *а* — теплоизоляция; *б* — источник нейтрино; *в* — биологическая защита; *з* — теплообменник; *д* — контейнер; T_1 — входное термосопротивление; T_2 — выходное термосопротивление; 2 — расходомер; 3 — термостат; 4 — байпас; 5 — шестеренчатый насос; 6 — температурный демпфер; М — манометр

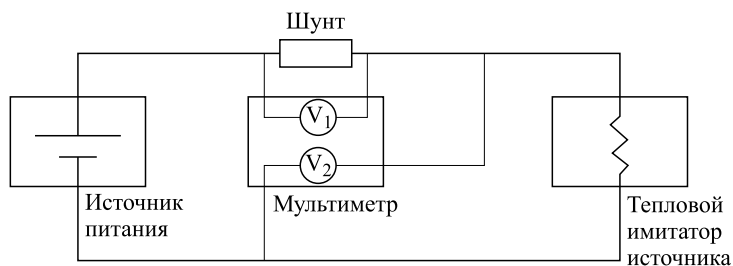


Рис. 2. Электрическая схема измерения подаваемой на имитатор мощности

в которой используется следующее прецизионное оборудование: а) программируемый источник питания постоянного тока Sorensen XHR 300-3.5; б) двухканальный цифровой мультиметр ADVATEST R6452E с погрешностью измерения напряжения не более 0,01 В; в) измерительный шунт ИШМ (калибровка ВНИИФТРИ) с сопротивлением $(52,14 \pm 0,01)$ Ом. Основной вклад в неопределенность измерения подаваемой мощности вносит ошибка сопротивления шунта, неопределенность значения подаваемой мощности составляет 0,03 %.

1.3. Разработка программного обеспечения калориметрической системы. Для автоматизации работы калориметрической системы было разработано программное обеспечение на основе пакета LabVIEW (National Instruments). Программа обеспечивает считывание и сохранение данных расхода, плотности, массы и температуры теплоносителя, проходящего через расходомер; входной и выходной температуры теплоносителя, проходящего через источник; напряжения на нагревателе и на токовом шунте, определяющего подаваемую на имитатор источника мощность.

Полученные данные расхода и температуры теплоносителя представляются в виде временного графика. Для определения установившегося режима проводится линейная аппроксимация разности выходной и входной температуры теплоносителя в заданном временном интервале. Для проведения калибровки калориметра в динамическом режиме разработанное программное обеспечение позволяет регулировать подаваемую на имитатор источника мощность по закону $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ с учетом распада ^{51}Cr с периодом полураспада 27,7 сут.

1.4. Калибровка калориметра. В калориметре проточного типа тепловыделение прямо пропорционально разности выходной и входной температуры теплоносителя:

$$N = kQ(T_0 - T_i), \quad (1)$$

где N — тепловыделение источника, Вт; k — коэффициент пропорциональности, который в случае отсутствия тепловых потерь равен удельной тепло-

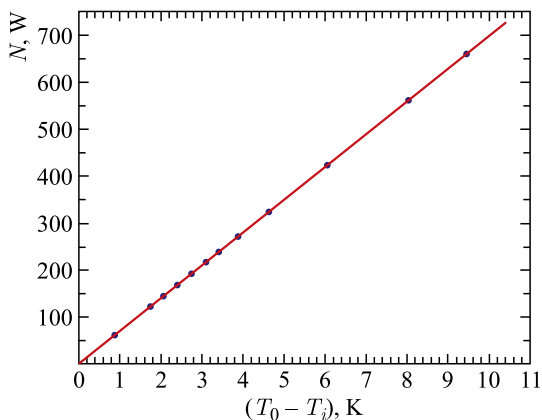


Рис. 3. Калибровочная зависимость калориметра: ● — экспериментальные точки, сплошная линия — линейная аппроксимация

емкости теплоносителя, Дж/(кг · град); Q — расход теплоносителя, кг/с; T_0 — температура на выходе из теплообменника, К; T_i — температура на входе в теплообменник, К.

На рис. 3 представлены результаты проведенной калибровки калориметра в статическом режиме (при постоянной подаваемой мощности). Получена линейная зависимость мощности от изменения температуры теплоносителя со следующими параметрами аппроксимации: $N(dT) = (69,677 \pm 0,079) dT + (0,62 \pm 0,36)$, с коэффициентом корреляции 0,99998.

Полученное из калибровочной зависимости значение теплоемкости дистиллированной воды составило $c_p^{\text{экс}} = (4180,6 \pm 2,3)$ Дж/кг · К и совпадает с табличным значением $c_p^{\text{табл}} = 4180,2$ Дж/кг · К [11], что свидетельствует о крайне малых теплотерях. Теплотери измерительной ячейки были оценены по падению выходной температуры при поддержании повышенной входной температуры теплоносителя (35°C) без подачи мощности на нагреватель и составили 0,3 Вт/К. В реальном эксперименте измерения тепловыделения будут проводиться в условиях, когда средняя температура теплоносителя будет поддерживаться равной температуре окружающей среды, чтобы свести теплообмен с окружающей средой к минимуму, а теплотери — к нулю.

На основании полученных экспериментальных данных была изготовлена измерительная ячейка калориметра, которая будет использоваться в измерениях с реальным источником (рис. 4). Для проведения калибровки калориметра как в статическом, так и в динамическом режимах изготовлен тепловой имитатор источника с теплофизическими параметрами (геометрия, теплоемкость и теплопроводность), максимально приближенными к параметрам ре-

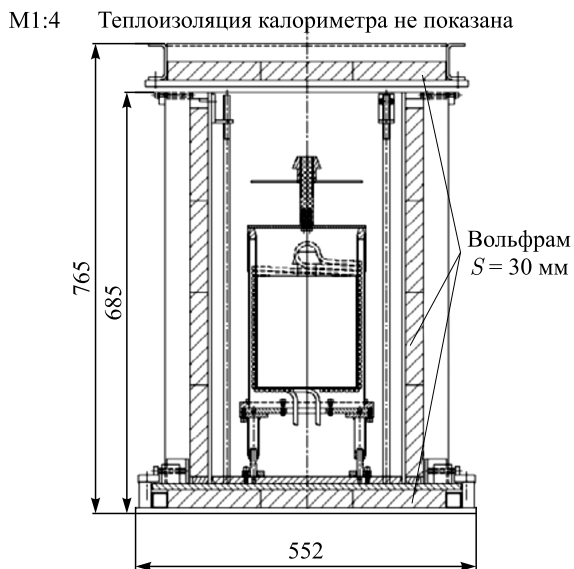


Рис. 4. Чертеж и фотографии измерительной ячейки калориметра без и с теплоизоляцией



Рис. 5. Калориметрическая система измерения активности искусственного источника нейтрино на основе ^{51}Cr

ального источника. Внешний вид калориметрической системы представлен на рис. 5.

В таблице и на рис. 6 представлены результаты калибровки калориметра в статическом режиме. В качестве теплоносителя использовался 40 %-й изопропиловый спирт.

Ошибка измерений тепловыделения в диапазоне тепловой мощности источника 150–520 Вт составляет менее 0,5 %, а при значениях 270–700 Вт — менее 0,25 %.

Калибровочная зависимость калориметра является линейной со следующими параметрами аппроксимации: $N(dT) = (49,726 \pm 0,070) dT + (-0,08 \pm 0,43)$, с коэффициентом корреляции 0,99999.

Экспериментальные данные калибровки калориметра в статическом режиме

| $T_2 - T_1$, К | $\sigma_{(T_2 - T_1)}$, К | N , Вт | σ_N , Вт | σ_N , % |
|-----------------|----------------------------|----------|-----------------|----------------|
| 0,950 | 0,002 | 47,05 | 0,45 | 0,96 |
| 1,680 | 0,003 | 83,19 | 0,47 | 0,57 |
| 2,707 | 0,001 | 134,65 | 0,48 | 0,36 |
| 3,772 | 0,008 | 187,33 | 0,64 | 0,34 |
| 5,353 | 0,002 | 266,80 | 0,58 | 0,22 |
| 5,954 | 0,003 | 296,54 | 0,62 | 0,21 |
| 6,432 | 0,004 | 320,12 | 0,65 | 0,20 |
| 7,620 | 0,004 | 377,67 | 0,72 | 0,19 |
| 9,380 | 0,006 | 465,60 | 0,83 | 0,18 |
| 10,426 | 0,008 | 519,09 | 0,95 | 0,18 |

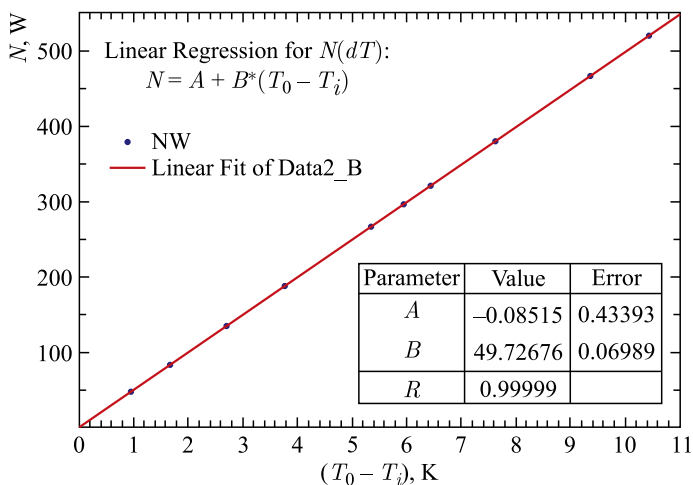


Рис. 6. Калибровочная зависимость калориметра в статическом режиме: • — экспериментальные точки; сплошная линия — линейная аппроксимация

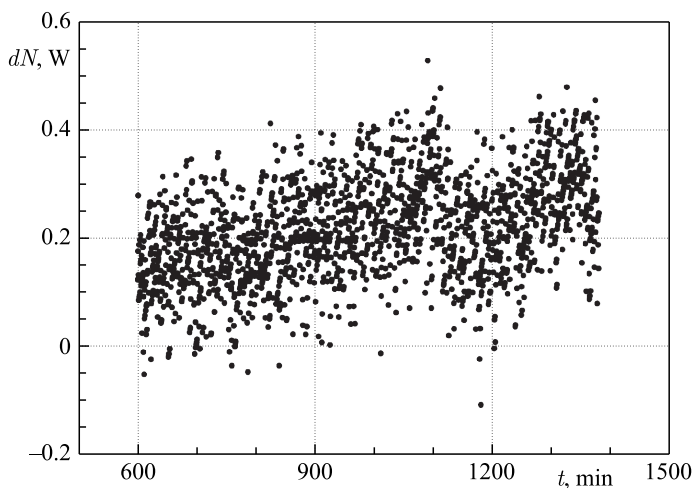


Рис. 7. Разность между подаваемой мощностью, меняющейся по экспоненциальному закону радиоактивного распада, и мощностью, рассчитанной из статической калибровочной зависимости

Реальные измерения активности искусственного источника нейтрино будут происходить в условиях распада ^{51}Cr , поэтому для оценки влияния изменения активности источника в течение измерений (~ 6 ч) были проведены первые измерения тепловыделения при подаче на имитатор мощ-

ности, меняющейся по экспоненциальному закону радиоактивного распада: $N_2 = N_1 \exp(-\ln 2 \cdot t/T_{1/2})$, $T_{1/2} = 27,7$ сут. На рис. 7 показана разность между подаваемой мощностью и мощностью, рассчитанной из статической калибровочной зависимости $dN = N_{\text{set}} - k_{\text{stat}} dT$. Среднее значение этой разности составило $dN = 0,24 \pm 0,09$ Вт, что составляет 0,06 % от подаваемой мощности, т. е. является пренебрежимо малой величиной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и изготовлена калориметрическая система для измерения активности искусственного источника нейтрино на основе ^{51}Cr с начальной активностью 3 МКи. Неопределенность измерения тепловыделения источника составила менее 0,5 % в диапазоне тепловых мощностей 150–600 Вт и менее 0,25 % в диапазоне 270–600 Вт. С учетом полученного значения неопределенности измерения тепловыделения и известного значения неопределенности энерговыделения при распаде ^{51}Cr (0,23 %) активность искусственного источника нейтрино может быть определена с точностью $\sim 0,5$ %. Предварительные результаты калибровки системы в динамическом режиме показали, что систематическая ошибка определения активности источника, связанная с изменением активности во времени, составила не более 0,06 %.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-02-00800).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Abdurashitov J. N. et al. (SAGE Collab.) // Phys. Rev. C. 1999. V. 59. P. 2246.*
2. *Abdurashitov J. N. et al. (SAGE Collab.) // Phys. Rev. C. 2006. V. 73. P. 045805.*
3. *Anselmann P. et al. (Gallex Collab.) // Phys. Lett. B. 1995. V. 342. P. 440.*
4. *Hampel W. et al. (Gallex Collab.) // Phys. Lett. B. 1998. V. 420. P. 114.*
5. *Giunti C. // Mod. Phys. Lett. A. 2007. V. 22. P. 2499.*
6. *Gariazzo S., Giunti C., Laveder M., Li Y. F., Zavanin E. M. arXiv:1507.08204. 2015.*
7. *Gavrin V. N., Gorbachev V. V., Veretenkin E. P., Cleveland B. T. arXiv:1006.2103. 2010. 10 p.*
8. *Veretenkin E. P., Gavrin V. N., Danshin S. N., Ibragimova T. V., Kozlova Yu. P., Mirmov I. N. // Phys. At. Nucl. 2015. V. 78, No. 14. P. 1606–1609.*
9. *Gorbachev V. V., Gavrin V. N., Ibragimova T. V., Kalikhov A. V., Malyshkin Yu. M., Shikhin A. A. // Phys. At. Nucl. 2015. V. 78, No. 14. P. 1617–1620.*
10. *Chechev V. P., Kuzmenko N. K. et al. Table de Radionucléides ^{51}Cr . V. 1. P. 51–54. BIPM, 2004.*
11. *Wagner W., Pruff A. // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2002. V. 31. P. 387.*