ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2024, № 1

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.074.8

ДЕТЕКТОР ИМПУЛЬСНОГО НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АКТИВАЦИОННОГО ТИПА С НЕПРЕРЫВНОЙ ЗАПИСЬЮ ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ ИМПУЛЬСОВ ВТОРИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

© 2024 г. А. А. Козлов[a], А. В. Козлов[a,*], В. Е. Завалова[a]

[a]*Объединенный институт высоких температур Российской академии наук*

Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, с.2

**e-mail: kozlov_a.a@fites.ru*

Поступила в редакцию 11.06.2024 г.

После доработки 03.09.2024 г.

Принята к публикации 23.09.2024 г.

Описан детектор импульсного нейтронного излучения активационного типа с непрерывной записью зарегистрированных импульсов вторичных электронов в режиме реального времени. В качестве активационного материала используется серебряная фольга толщиной 0.3 мм. Для регистрации вторичных электронов взят газоразрядный счетчик Гейгера–Мюллера промышленной марки СБМ-19, чувствительный к жесткому бета- и гамма-излучениям. Интервал записи накопленного числа зарегистрированных импульсов вторичных электронов составляет 10 с. Объем циклического буфера памяти, используемого для записи зарегистрированных импульсов вторичных электронов, составляет 16 Мб, что обеспечивает непрерывную запись в течение 2.5 лет. В качестве источника питания детектора импульсного нейтронного излучения используется современный гальванический элемент $LiSOCl_2$ напряжением 3.6 В с емкостью 2.1 А·ч. Расчетное время эксплуатации без замены элемента питания составляет 5 лет.

1. ВВЕДЕНИЕ

Простейший метод регистрации импульсного нейтронного излучения – оценка его потока по наведенной радиоактивности в фольгах из Rh, Ag, In, Au [1, 2]. В настоящей работе представлен детектор, принцип действия которого основан на замедлении быстрых нейтронов в замедлителе из парафина и активации ими фольги из серебра. При активации серебра нейтронами, как известно, образуются два изотопа: серебро-110 (^{110}Ag) с периодом полураспада 24.2 с и серебро-108 (^{108}Ag) с периодом полураспада 2.42 мин. Основной вклад во вторичную эмиссию электронов вносит распад серебра-110, поскольку сечение

взаимодействия исходного замедленного нейтронного излучения для серебра-110 существенно выше, чем для серебра-108. Кроме того, период полураспада для серебра-110 существенно меньше, чем для серебра-108, что позволяет проводить эксперименты с импульсными источниками нейтронов значительно чаще.

Представлен детектор импульсного нейтронного излучения, который основан на активационной методике с затянутой регистрацией: сначала быстрые нейтроны замедляются в блоке из парафина, далее уже замедленные нейтроны взаимодействуют с фольгой из серебра толщиной 0.3 мм. Регистрация вторичных электронов осуществляется с помощью счетчика Гейгера–Мюллера СБМ-19.

2. СТРУКТУРА ДЕТЕКТОРА

Конструктивно блок замедлителя нейтронов выполнен из двух коаксиальных труб из полиэтилена, которые соединены между собой с помощью двух фланцев из поликарбоната. Наружный диаметр внешней трубы составляет 160 мм, а внутренний диаметр меньшей трубы составляет 35 мм. Длина цилиндрического корпуса замедлителя составляет 180 мм. Объем между внутренней и внешней трубами заполнен парафином. Фольга из серебра толщиной 0.3 мм намотана без зазоров на счетчик Гейгера–Мюллера СБМ-19. К электродам счетчика Гейгера–Мюллера СБМ-19 припаян коаксиальный кабель РК50-4 длиной 0.5 м с коаксиальным разъемом СР-50 на конце. На счетчик Гейгера–Мюллера СБМ-19 с намотанной серебряной фольгой и припаянным кабелем надевается термоусаживаемая трубка для фиксации фольги и кабеля, которая дополнительно защищает обслуживающий персонал от случайного контакта с электродами счетчика Гейгера–Мюллера СБМ-19, на которых во время работы появляется опасное напряжение. Подготовленный таким образом счетчик Гейгера–Мюллера СБМ-19 помещается внутрь блока замедлителя. На рис.1 представлена принципиальная электрическая схема электронной части детектора нейтронов.

Рис. 1. Принципиальная электрическая схема детектора нейтронного излучения.

Для управления детектором нейтронного излучения используется современный микроконтроллер EFM32G222 обозначенный на рис.1 как DD_1. Основной особенностью этого микроконтроллера является то, что он способен работать в спящем режиме, просыпаясь только по прерываниям от сигналов с внешних или внутренних устройств, потребляя при этом ток не более 1 мкА.

Функционально детектор нейтронного излучения состоит из следующих узлов:

1. Источник питания счетчика Гейгера–Мюллера СБМ-19 с выходным напряжением 350 В.

2. Детектор импульсов поступающих со счетчика Гейгера–Мюллера СБМ-19.
3. Часы реального времени с заданным интервалом времени счета импульсов и хранением текущего времени.
4. Энергонезависимая память, которая используется для непрерывного хранения числа накопленных импульсов со счетчика Гейгера–Мюллера СБМ-19.
5. Источник автономного питания с напряжением 3.6В.
6. Узел связи с персональным компьютером и внешним монитором контроля текущего значения накопленных импульсов со счетчика Гейгера–Мюллера СБМ-19.

3. ПРИНЦИП РАБОТЫ И ЗАПИСИ ИЗМЕРЕНИЙ

Источник питания счетчика Гейгера–Мюллера СБМ-19 с выходным напряжением 350В состоит в свою очередь из управляемого повышающего DC-DC преобразователя, генератора накачки и 18-кратного умножителя напряжения с накопительной емкостью. Повышающий преобразователь *DC–DC* состоит из управляющего транзистора T_2, индуктивности L_1, диода D_6 и накопительной емкости C_{12}. Управление повышающим преобразователем *DC–DC* осуществляется непосредственно микроконтроллером. Уровень напряжения с накопительной емкости проверяется детектором, состоящим из защитного диода D_7, фиксирующего диода D_8 и резистора R_{11}. Сигнал с детектора поступает на вход компаратора микроконтроллера. Каждые 60 мкс микроконтроллер проверяет уровень сигнала от детектора, если он меньше некоторого заранее заданного значения, микроконтроллер на 10 мкс включает транзистор T_2, ток в индуктивности начинает расти и по истечении 10 мкс достигает величины 1.2 А. Затем транзистор выключается и накопленная энергия в индуктивности поступает через диод D_6 на накопительную емкость C_{12}, напряжение на которой начинает расти. Если же напряжение детектора больше этого заранее заданного значения, микроконтроллер не включает транзистор T_2. Таким образом, происходит стабилизация напряжения накопительной емкости. Уровень напряжения накопительной емкости составляет 20 В. Напряжение накопительной емкости преобразователя *DC–DC* поступает на генератор накачки.

Генератор накачки преобразует постоянное напряжение накопительной емкости в импульсно-периодический сигнал переменной полярности с амплитудой 20 В. Генератор накачки состоит из транзисторной сборки DD_4, транзисторов T_3–T_5, диода D_9, конденсатора C_{13} и резисторов R_{12}, R_{13}. Принцип работы генератора накачки, следующий: микроконтроллер каждые 60 мкс по очереди включает/выключает транзисторы T_3, T_4 с небольшой задержкой между включением/выключением. При включении транзистора T_4 одновременно через сопротивления R_{12}, R_{13} включается транзисторная сборка DD_4. Транзистор T_3 при этом

находится в выключенном состоянии. Напряжение накопительной емкости C_{12} через транзисторную сборку DD_4 поступает на выход генератора накачки и на заряд конденсатора C_{13}. Диод D_9 и включенный транзистор T_4 обеспечивают прохождения тока заряда конденсатора C_{13} в этом цикле. При включении транзистора T_3 и выключении транзистора T_4 одновременно выключается транзисторная сборка DD_4. Напряжение обратной полярности конденсатора C_{13} через транзистор T_5 поступает на выход генератора накачки. Таким образом, за два такта на выходе генератора накачки формируются импульсы напряжения разной полярности с амплитудой 20 В. Полученный импульсно-периодический сигнал переменной полярности поступает через конденсатор C_{14} на 18-кратный стандартный умножитель напряжения. Умноженное таким образом напряжение поступает на заряд емкостного накопителя C_{33}. Ток заряда емкостного накопителя измеряется с помощью резистора R_{16}, зашунтированного защитными диодами D_{28}, D_{29}. Напряжение с измерительного резистора R_{16} поступает на вход встроенного в микроконтроллер АЦП, и в каждом такте работы генератора накачки сравнивается с заданным порогом. При снижении напряжения ниже заданного порога предполагается, что напряжение на накопительной емкости достигло своего заданного значения 350 В. Генератор накачки при этом прекращает свою работу, и микроконтроллер переходит в спящий режим. При этом выключается также преобразователь *DC–DC*. В этом режиме работы микроконтроллер только считает импульсы, поступающие от детектора импульсов со счетчика Гейгера–Мюллера СБМ-19, ожидает команды от персонального компьютера, и ожидает сигнал от микросхемы часов реального времени об окончании периода счета импульсов.

Детектор импульсов со счетчика Гейгера–Мюллера СБМ-19 состоит из развязывающего конденсатора C_{34}, защитных диодов D_{30}, D_{31}, подтягивающего резистора R_{19} и защитного резистора R_{18}. Импульсы напряжения со счетчика Гейгера–Мюллера СБМ-19 представляют собой отрицательные по отношению к напряжению питания импульсы длительностью 300 мкс и амплитудой 30–100 В. Конденсатор C_{34} убирает постоянную составляющую питания счетчика Гейгера–Мюллера СБМ-19 и передает сам импульс на диодный ограничитель на диодах D_{30}, D_{31}. Диодный ограничитель уменьшает размах импульсного напряжения до напряжения питания детектора нейтронного излучения. Ограниченное таким образом импульсное напряжение через защитный резистор R_{18} поступает на вход встроенного в микроконтроллер компаратора. Микроконтроллер просыпается после срабатывания компаратора и увеличивает на единицу накопленное значение количества пришедших импульсов, запоминает новое значение в своей памяти и засыпает снова. Получив сигнал об

окончании периода счета импульсов с микросхемы часов реального времени DD_2, микроконтроллер также просыпается.

Далее записывает в энергонезависимую память DD_3 накопленное за заданный период времени значение пришедших со счетчика Гейгера–Мюллера СБМ-19 импульсов, передает это значение посредством волоконно-оптического передатчика на светодиоде D_1 с помощью протокола USART во внешний монитор, затем обнуляет значение накопленных импульсов в своей памяти и снова засыпает. Волоконно-оптический светодиод D_1 адаптирован под применение пластикового световода диаметром 2 мм. Использование пластикового световода для передачи информации о значении накопленных импульсов во внешний монитор облегчает задачу по монтажу и гальванической развязке между детектором нейтронного излучения и монитором, расположенным в пультовой. Пластиковые световоды легко обрезаются по длине без применения специального оборудования и не требуют специальных разъемов, в отличие от кварцевых световодов. Волоконно-оптические пластиковые светодиоды уже содержат цанговый зажим под крепление. Кроме того, в спящем режиме микроконтроллер может принимать команды управления от персонального компьютера с помощью внешнего преобразователя USB в COM, который подключается к детектору нейтронного излучения через аудиоразъем XS2. По команде от управляющего компьютера может быть проведена синхронизация текущего времени компьютера и часов реального времени детектора нейтронного излучения. Также может быть считана информация о значениях накопленных импульсов от энергонезависимой памяти за все время наблюдения.

Период накопления импульсов со счетчика Гейгера–Мюллера СБМ-19 составляет 10 с, это значение устанавливается при программировании микросхемы часов реального времени. Емкость энергонезависимой памяти составляет 16 Мб и этого количества достаточно для непрерывной записи накопленных за 10 с импульсов от счетчика Гейгера–Мюллера СБМ-19 в течение более чем 2.5 лет. При заполнении всей памяти процесс записи продолжается по циклу с уничтожением самой ранней информации о накопленных значениях импульсов от счетчика Гейгера–Мюллера СБМ-19. В структуру блока данных о накопленных значениях импульсов входит также информация о точном времени записи этого блока данных. Фактически счетчик нейтронного излучения хранит полную информацию о нейтронном излучении с точной привязкой по времени (аналог черного ящика). В качестве источника питания детектора нейтронного излучения используется современный гальванический элемент $LiSOCl_2$ напряжением 3.6 В с емкостью в 2.1 А · ч и очень низким уровнем саморазряда, порядка 1% в год.

Для повышения надежности микроконтроллер периодически раз в четыре секунды с помощью встроенного Watchdog-таймера перезапускает свою управляющую программу. Такой режим при любом сбое программы от наводок возвращает микроконтроллер к правильной работе. Измеренный ток потребления при работе с подключенным счетчиком Гейгера–Мюллера СБМ-19 в режиме фонового излучения не превышает 40 мкА. При таком токе потребления расчетное значение непрерывного времени без замены гальванического элемента составляет более 5 лет.

Конструктивно электронная часть детектора нейтронного излучения располагается на печатной плате, которая находится внутри стальной трубы с внешним диаметром 40 мм и длиной 170 мм. На концах трубы нарезана внешняя резьба, на которую накручены два фланца. На один фланец установлен разъем СР-50 для подключения счетчика Гейгера–Мюллера СБМ-19, а второй фланец имеет по центру отверстие для пластикового световода, по которому информация передается на внешний монитор. Внешний вид детектора нейтронов показан на рис.2.

Рис. 2. Внешний вид детектора нейтронов: *1*– блок замедлителя нейтронов с СБМ-19, *2* – детектор импульсного нейтронного излучения.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРОВЕРКИ ПРИБОРА

Работа прибора была апробирована на установке импульсного плазменного ускорителя (ИПУ), разработанного в Шатурском филиале ОИВТ РАН. Описание ускорителя представлено в работе [3]. Основными элементами коаксиального ИПУ являются два коаксиальных электрода: центральный – катод, внешний – анод. За электродами идет диагностическая секция. В состав ИПУ также входит система соленоидов для создания внешнего квазистационарного магнитного поля. В промежутке между электродами через систему отверстий в центральном электроде при помощи быстродействующего электродинамического клапана напускается дозированное количество рабочего газа. При подаче на электроды высокого напряжения происходит пробой и ионизация рабочего газа, замыкающая контур нагрузки ускорителя. Далее происходит формирование и разгон плазменного сгустка под действием силы Ампера, возникающей вследствие взаимодействия радиальной составляющей электрического тока в плазме между электродами ИПУ и собственным магнитным полем в контуре с током. В конце ускорительного тракта в диагностической секции устанавливается твердотельная мишень. Мишень служит для торможения плазменного потока с целью преобразования кинетической энергии плазменной

струи в энергию излучения. По возникающей вспышке излучения при торможении потока в случае достижения условий термоядерной реакции возникает поток нейтронов, что и регистрируется описанным выше детектором нейтронного излучения. Результаты работы детектора в виде временной диаграммы импульсов вторичных электронов при проведении экспериментов на ИПУ в течение одного рабочего дня представлены на рис. 3.

Рис. 3. Временная диаграмма импульсов вторичных электронов, зарегистрированных детектором нейтронов при проведении экспериментов на импульсном ускорителе в течение одного рабочего дня.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение описанного детектора нейтронного излучения является актуальным в задачах водородной и термоядерной энергетики, когда по нейтронному выходу судят об эффективности различных плазменных процессов в реальном масштабе времени. Экспериментальная апробация прибора на действующей установке ИПУ показала работоспособность прибора и его преимущества, такие как:

- надежная регистрация и запись во времени всех случаев, когда присутствует нейтронный выход излучения в экспериментах;
- технологичность в сборке, в отличие от аналогов сборка не содержит никаких намоточных изделий;
- комплектация только из покупных серийных изделий;
- простота в использовании, так как не требуется никакой предварительной настройки в течение всего цикла экспериментов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках программы исследований, проводимых ОИВТ РАН по теме “Исследование физических процессов, обеспечивающих увеличение энергосодержания плазменного потока, в импульсном ускорителе” (FFUE-2022-0012).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бекурц К., Виртц К.* Нейтронная физика. Москва: Атомиздат, 1968.
2. *Knoll G.F.* Radiation detection and measurement. New York: Wiley, 2000.
3. *Козлов А.В., Маштаков А.В., Шурупов А.В., Гусев А.Н., Завалова В.Е., Шурупов М.А., Шурупова Н.П., Житлухин А.М, Бахтин В.П..* // Теплофизика высоких температур. 2022. № 3(60). С. 331. https://doi.org/10.31857/S0040364422010306

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Принципиальная электрическая схема детектора нейтронного излучения.

Рис. 2. Внешний вид детектора нейтронов: *1* – блок замедлителя нейтронов с СБМ-19, *2* – детектор импульсного нейтронного излучения.

Рис. 3. Временная диаграмма импульсов вторичных электронов, зарегистрированных детектором нейтронов при проведении экспериментов на импульсном ускорителе в течение одного рабочего дня.

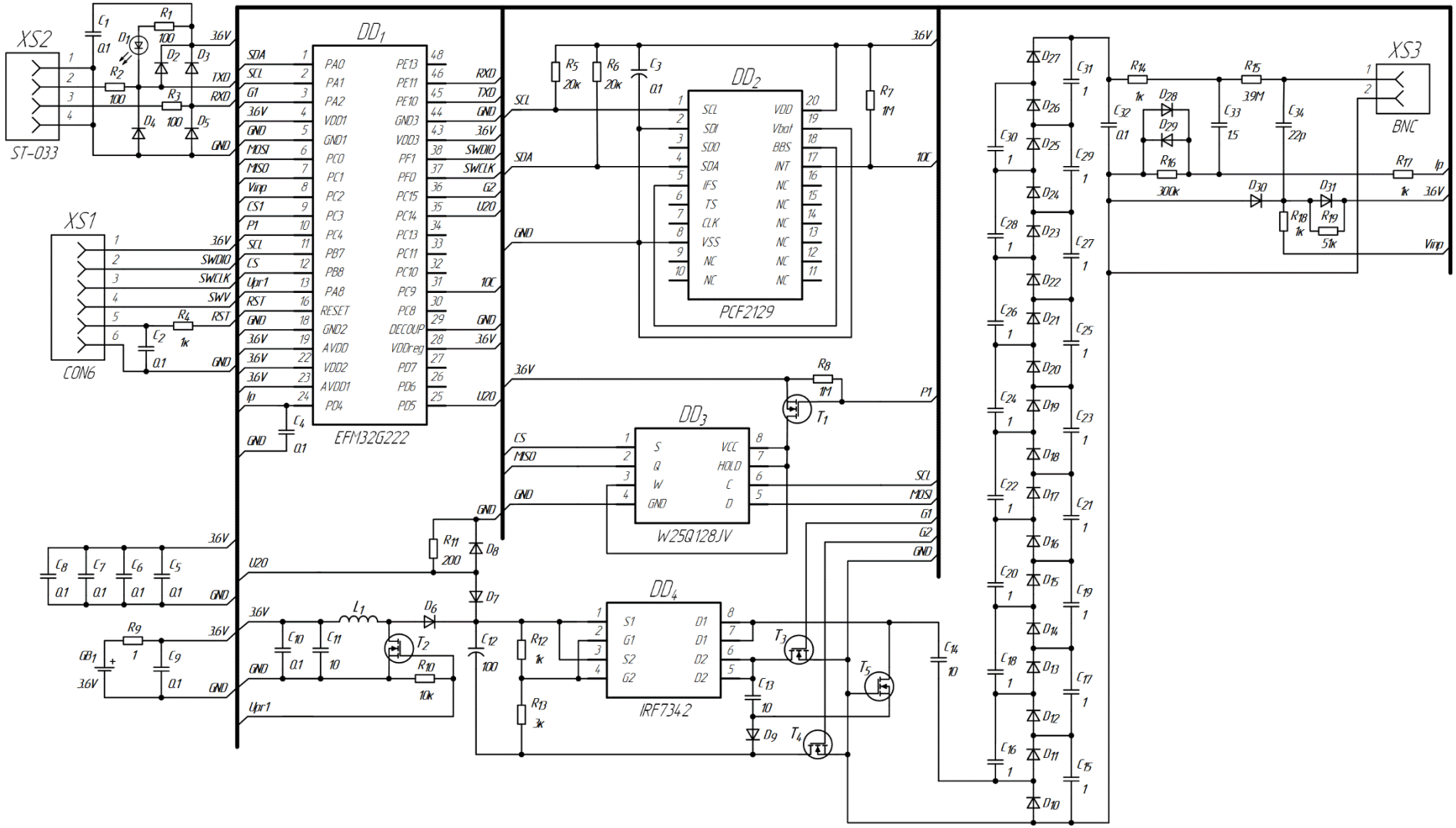
XS2
ST-033
XS1
CON6
DD1
EFM32G222
DD2
PCF2129
DD3
W25Q128JV
DD4
IRF7342
XS3
BNC
GB1
3.6V
GND
TXD
RXD
SWDIO
SWCLK
SWV
RST
SDA
SCL
MOSI
MISO
CS
Upr1
Up
Vinp
U20
10C
P1
G1
G2

Рис. 1.

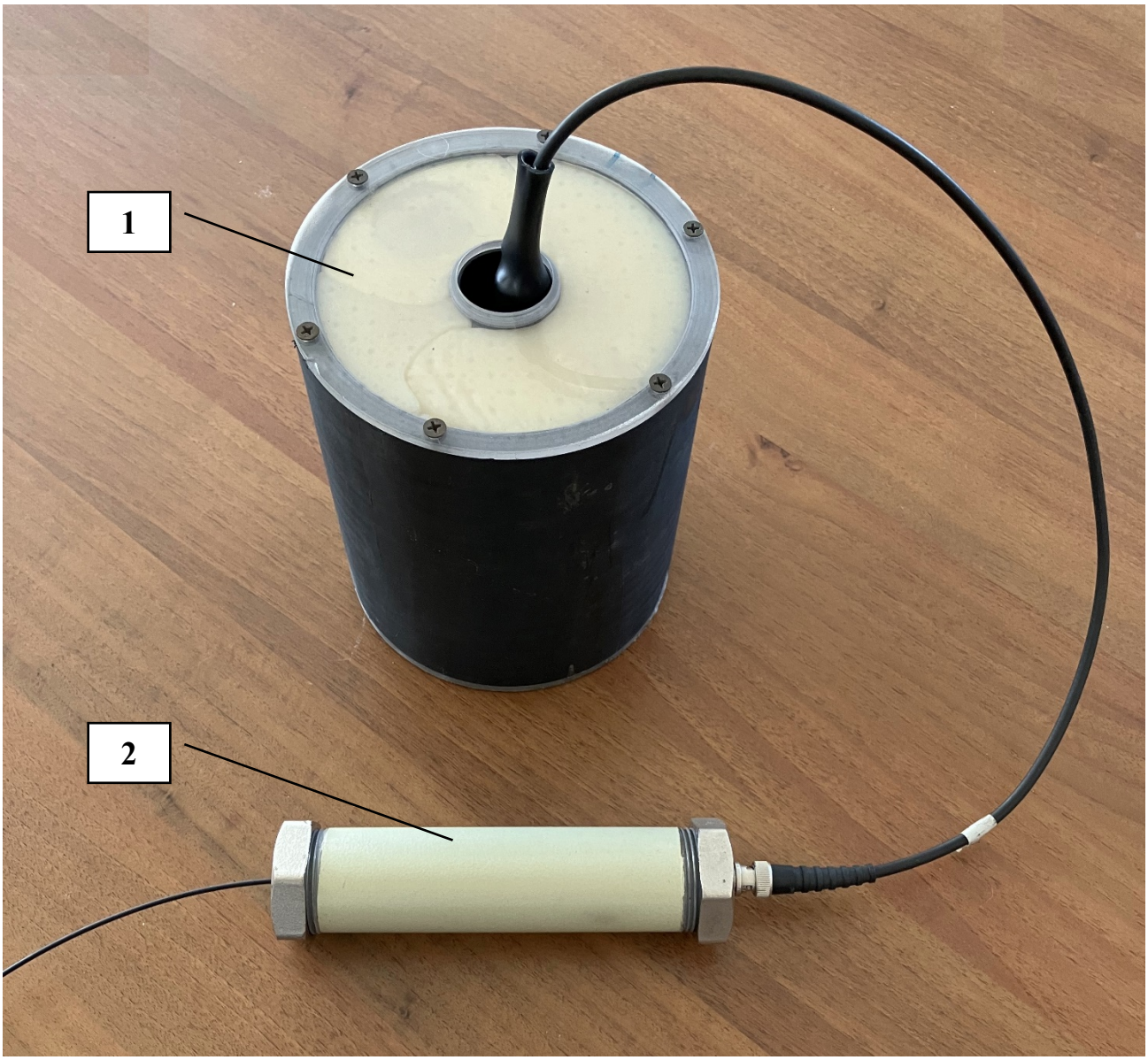

Рис. 2.

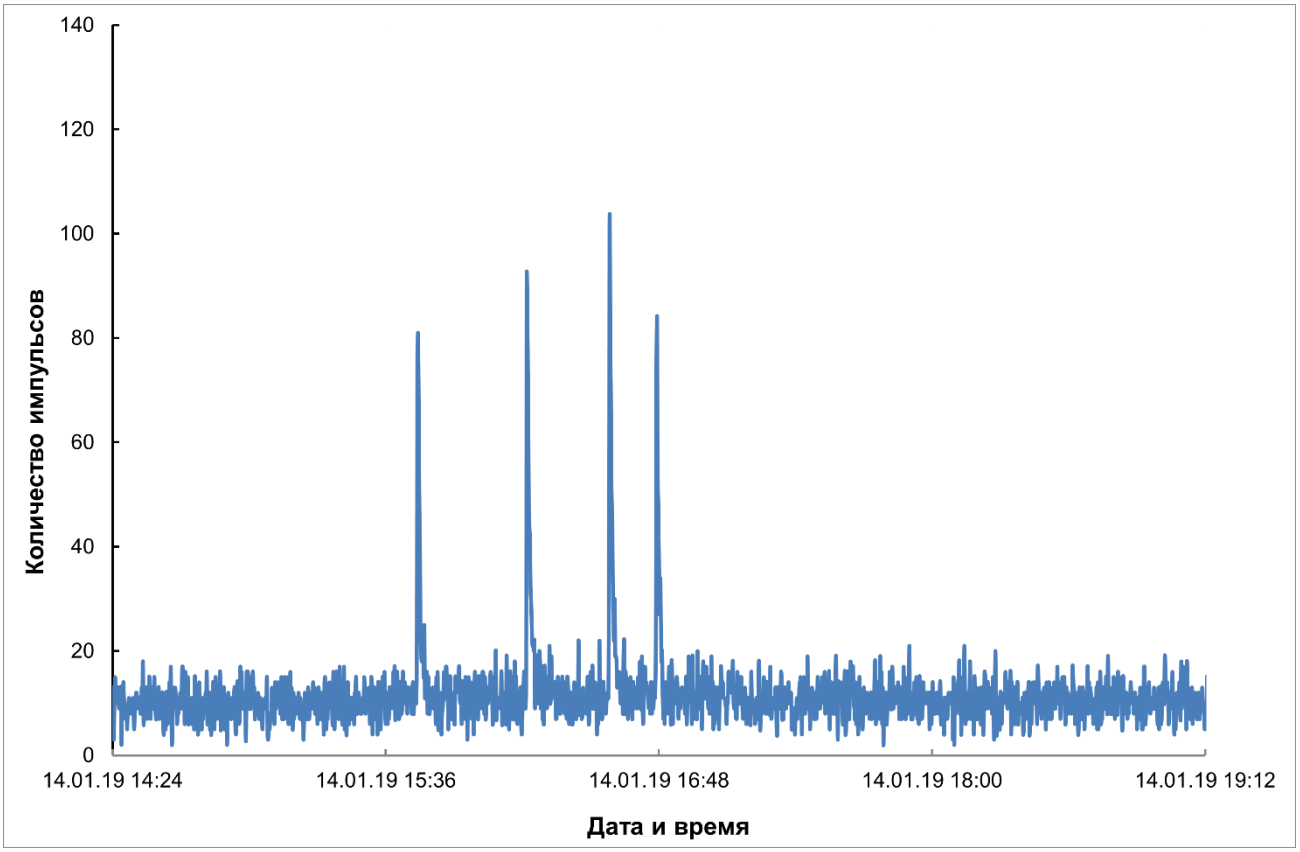
140
120
100
80
60
40
20
0
Количество импульсов
14.01.19 14:24
14.01.19 15:36
14.01.19 16:48
14.01.19 18:00
14.01.19 19:12
Дата и время

Рис. 3.

~~**Для переводчика:**~~

~~**Activation type pulsed neutron radiation detector with continuous recording of registered pulses of secondary electrons in real time**~~

~~A.A. kozlov, A.V. Kozlov, V.E. Zavalova~~

~~Joint Institute for High Temperatures of RAS, Izhorskaya st. 13 Bd. 2, Moscow, 125412, Russia~~

~~Abstract~~

~~A detector of pulsed neutron radiation of the activation type with continuous recording of registered pulses of secondary electrons in real time is described. 0.3 mm thick silver foil is used as activation material. A gas-discharge Geiger-Muller counter, industrial grade SBM-19, sensitive to hard beta and gamma radiation, was taken to register secondary electrons. The recording interval of the accumulated number of registered secondary electron pulses is 10 seconds. The circular memory buffer used to record the recorded secondary electron pulses is 16 MB, providing continuous recording for 2.5 years. A modern LiSOCl2 galvanic cell with a voltage of 3.6 V and a capacity of 2.1 Ah was used as a power source for the pulsed neutron radiation detector. The estimated operating time without replacing the battery is 5 years.~~