

УДК 539.1.075

## МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ КРИОСТАТИРОВАНИЯ ЭМИССИОННОГО ДЕТЕКТОРА РЭД-100 ДЛЯ РАБОТЫ С ЖИДКИМ АРГОНОМ

© 2024 г. И. С. Александров<sup>a, b</sup>, В. А. Белов<sup>c, a</sup>, А. И. Болоздыня<sup>a, \*</sup>,  
А. А. Васин<sup>a</sup>, А. В. Галаванов<sup>d, a</sup>, Ю. В. Гусаков<sup>d, a</sup>, А. Г. Коваленко<sup>c, a</sup>,  
Е. С. Козлова<sup>a</sup>, А. М. Коновалов<sup>e, a</sup>, В. Н. Корноухов<sup>a, f</sup>, А. В. Кумпан<sup>a</sup>,  
А. В. Лукьяшин<sup>a</sup>, А. В. Пинчук<sup>a</sup>, О. Е. Разуваева<sup>a, c</sup>, Д. Г. Рудик<sup>a</sup>,  
Г. Е. Симаков<sup>c, a</sup>, В. В. Сосновцев<sup>a</sup>, А. В. Хромов<sup>a, b</sup>, А. В. Шакиров<sup>a</sup>,  
А. В. Этенко<sup>c, a</sup>

<sup>a</sup>Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”  
Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31

<sup>b</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 43

<sup>c</sup>Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”  
Россия, 123098, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

<sup>d</sup>Объединенный институт ядерных исследований  
Россия, 141980, Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6

<sup>e</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева, Российской академии наук  
Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53

<sup>f</sup>Институт ядерных исследований Российской академии наук  
Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7-а

\*e-mail: aibolozdynya@mephi.ru

Поступила в редакцию 04.10.2023 г.

После доработки 27.10.2023 г.

Принята к публикации 29.11.2023 г.

Приведено описание модернизации криогенной системы двухфазного эмиссионного детектора РЭД-100 для обеспечения возможности работы с жидким аргоном в качестве рабочей среды с целью поиска эффекта упругого когерентного рассеяния реакторных электронных антинейтрино на ядрах аргона.

DOI: 10.31857/S0032816224040109 EDN: NYRXMI

### 1. СИСТЕМА ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ ДЕТЕКТОРА РЭД-100

Система термостатирования детектора РЭД-100 первоначально была разработана для ожижения и стабилизации температуры жидкого ксенона, используемого в качестве рабочей среды детектора для изучения процесса упругого когерентного рассеяния реакторных электронных антинейтрино (УКРН) на тяжелых

ядрах [1, 2]. Система основана на технологии трубчатых термосифонов [3] и включает 4 трубчатых термосифона диаметром 12 мм (рис. 1), в которых в качестве теплоносителя используется азот, а в качестве холодильника – бассейн свободно кипящего жидкого азота, размещенный в резервуаре над детектором (рис. 2). Теплообменники термосифонов установлены на охлаждаемом внутреннем сосуде криостата. Медные теплообменники 8 и 11 термосифонов

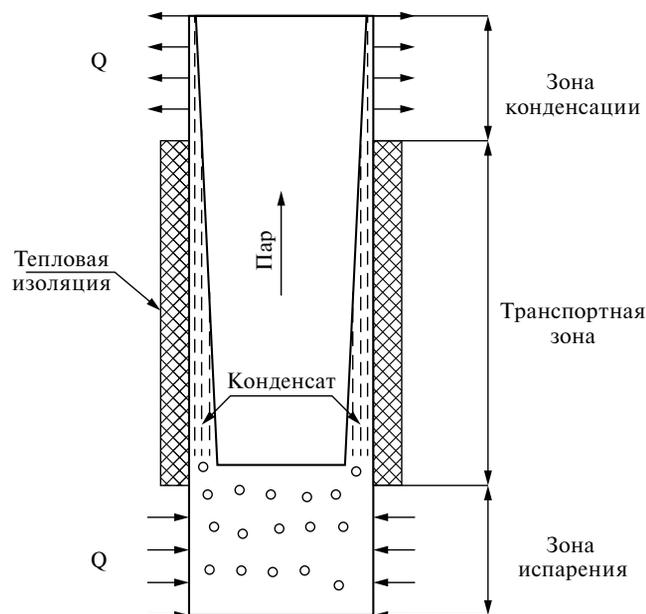


Рис. 1. Схема работы трубчатого термосифона из публикации [4].

ТС-1 и ТС-2 установлены в верхнем фланце и днище внутреннего сосуда криостата и задают градиент температур по высоте дрейфового объема детектора. Эти же термосифоны используются для конденсации рабочей среды детектора из газообразного состояния при заполнении детектора жидкостью. Дополнительные два боковых термосифона ТС-3 и ТС-4 [10] охлаждаются теплообменники, установленные на медном экране, окружающем камеру для выравнивания градиентов температур по окружности камеры (рис. 2). Состояние термосифонов (температура теплообменников и давление азота) контролируются с помощью датчиков, установленных в стойке станции контроля вместе с вентилями ручного управления заполнением термосифонов азотом. В качестве температурных датчиков используются терморезисторы Pt-100. На теплообменниках термосифонов установлено по два терморезистора Pt-100. Сигналы от одного из них идут на панель визуального контроля температуры, от другого – к модулю серии Adam-6000 (фирма Advantech) для непрерывного электронного мониторинга температуры теплообменников с выводом информации на экран компьютера. Станция контроля содержит две системы управления работой четырех термосифонов РЭД-100: ручную, содержащую 8 независимых каналов с ручными вентилями,

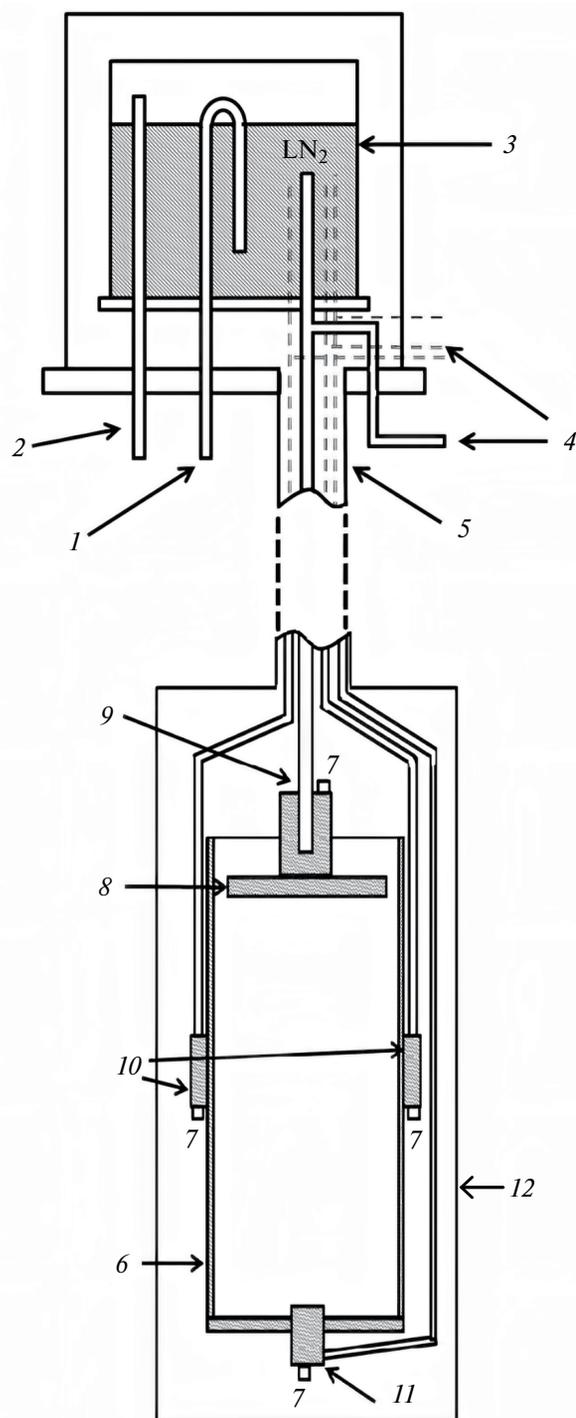
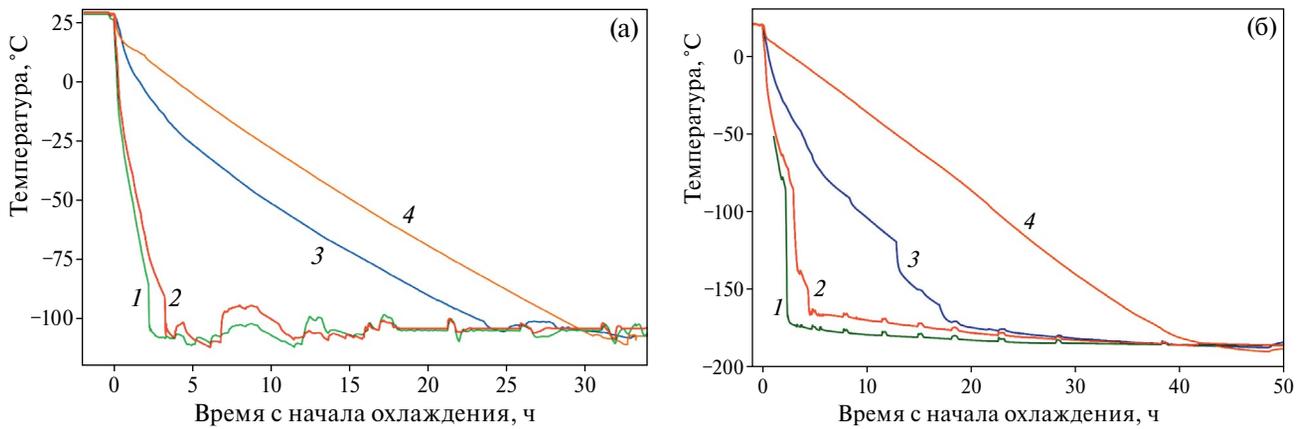


Рис. 2. Схема термосифонной системы криостатирования детектора РЭД-100 [2]: 1 – трубка заливки жидкого азота в резервуар 3, 2 – вентиляционная трубка, 3 – резервуар с жидким азотом, 4 – трубки для заполнения термосифонов газообразным азотом, 5 – вакуумированный металлорукав с трубчатыми термосифонами, 6 – охлаждаемый внутренний сосуд криостата, 7 – термодатчики, 8 – верхний теплообменник, 9 – термосифон ТС-1, 10 – теплообменники боковых термосифонов ТС-3 и ТС-4, 11 – теплообменник нижнего термосифона ТС-2, 12 – внешний кожух криостата детектора.



**Рис. 3.** Зависимости температур теплообменников, охлаждаемых трубчатыми термосифонами, от времени охлаждения детектора РЭД-100 при работе с ксеноном (а) и аргоном (б): 1 – для теплообменника термосифона ТС-4, 2 – для теплообменника термосифона ТС-3, 3 – для теплообменника термосифона ТС-2, 4 – для теплообменника термосифона ТС-1.

и дублирующую ее автоматическую, в которой потоками азота управляют контролируемые с помощью компьютера клапаны. Управление термосифонами для каждого канала выполняется независимо в основных режимах работы:

1) ожижение благородного газа при заполнении РЭД-100 рабочей средой,

2) стабилизация температуры при непрерывной циркуляционной очистке рабочего газа со скоростью 8–10 л/мин через горячий металлический геттер типа SAES MonoTorr.

Устойчивая работа разработанной системы термостатирования позволила провести эксперимент с детектором РЭД-100, заполненным жидким ксеноном (200 кг), на Калининской АЭС в период 2021–2022 гг. [5]. На рис. 3а представлены зависимости температуры теплообменников термосифонов от времени охлаждения РЭД-100 при работе с ксеноном.

## 2. МОДИФИКАЦИЯ СИСТЕМЫ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ ДЛЯ РАБОТЫ С АРГОНОМ

В настоящее время коллаборация РЭД-100 приступила к подготовке следующего этапа эксперимента на АЭС с использованием жидкого аргона в качестве рабочей среды детектора. Для поставленной задачи регистрации УКРН жидкий аргон выглядит более перспективной рабочей средой детектора по сравнению с ксеноном, поскольку обеспечивает более высокую энергию ядер отдачи в процессе рассеяния

антинейтрино, что позволяет повысить эффективность разделения полезных событий и фона одноэлектронных шумов [6]. Использование жидкого аргона в качестве рабочей среды детектора подразумевает необходимость охлаждения детектора до температуры  $-183^{\circ}\text{C}$ , что на  $80^{\circ}$  ниже, чем при использовании жидкого ксенона.

Для работы с жидким аргоном в качестве рабочей среды система термостатирования детектора РЭД-100 была модифицирована: внутренний диаметр основного трубчатого термосифона ТС-1, охлаждающего верхний теплообменник, на котором происходит ожижение рабочего вещества, был увеличен с 11 до 26 мм при сохранении длины и диаметра зоны испарения и длины зоны конденсации (рис. 1). Согласно проведенным измерениям (рис. 3), в случае “ксеноновой” версии системы термостатирования (рис. 3а) в диапазоне температур от  $+20^{\circ}\text{C}$  до  $-100^{\circ}\text{C}$  скорость охлаждения составляла примерно 4 град/ч, а в случае модифицированной “аргоновой” версии системы термостатирования в диапазоне температур от  $+20^{\circ}\text{C}$  до  $-180^{\circ}\text{C}$  составила примерно 5 град/ч и позволила охладить детектор до температуры  $-183^{\circ}\text{C}$ , как показано на рис. 3б.

Криогенная система РЭД-100 для аргона прошла лабораторные испытания в 2023 году в НИЯУ МИФИ. Было установлено, что модернизированная система криостатирования способна охладить детектор до температуры жидкого аргона ( $-183^{\circ}\text{C}$ ) примерно за 30 ч, а конденсация 100 кг аргона занимает примерно

трое суток. Помимо возможности эффективно охлаждения РЭД-100 для работы с жидким аргоном, была также испытана процедура стабилизации температуры детектора с точностью около  $0.1^\circ$  при непрерывной циркуляционной очистке аргона, включающей процессы испарения жидкой рабочей среды, циркуляции газообразного аргона через горячий металлический геттер типа MonoTorr и ожижение очищенного аргона в детектор со скоростью около 8–10 литров газа в минуту в течение трех недель. Это позволило достичь времени жизни квазисвободных электронов до захвата электроотрицательными примесями более 300 мкс. После выхода системы на стационарный температурный режим интервал между заливками очередной порции жидкого азота объемом 40 л в резервуар составил около 10 ч.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом показано, что модернизированная криогенная система установки РЭД-100 позволяет полноценно обеспечивать температурные режимы работы детектора при использовании жидкого аргона в качестве рабочего вещества детектора.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам кафедры № 7 НИЯУ МИФИ В.В. Дмитренко, В.Ф. Власику, З.М. Утешеву, А.И. Маджидову, руководству Института ядерной физики и технологий НИЯУ МИФИ за помощь в проведении работ.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда по модернизации установки РЭД-100 в рамках контракта № 22-12-00082 от 13 мая 2022 года.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Акимов Д.Ю., Александров И.С., Белов В.А., Болоздыня А.И. и др.* // ПТЭ. 2017. Т. 2. С. 2. <https://doi.org/10.7868/S0032816217010141>
2. *Болоздыня А.И., Ефременко Ю.В., Сидоренко А.В., Сошовцев В.В. и др.* // ПТЭ. 2016. Т. 3. С. 149.
3. *Lock G.S.H.* The Tubular Thermosyphon. Variations on a Theme. Oxford University Press, 1992.
4. *Фролов В.П., Шелгинский А.Я.* // Энергосбережение. 2004. Т. 6. С. 58.
5. *Akimov D.Yu., Aleksandrov I.S., Alyev R.R., Belov V.A. et al.* // JINST. 2022. V.17. P. T11011.
6. *RED-100 Collaboration* // Physics. 2023. V. 5. P. 492.