

# СОДЕРЖАНИЕ

---

---

Номер 3, 2025

---

---

## ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Встраиваемый контроллер для управления устройствами ускорительно-накопительного комплекса СКИФ

*Д. А. Липовый, Д. В. Сеньков, П. Б. Чеблаков, А. В. Герасев, С. Е. Карнаев* 4

Экспериментальные исследования для обоснования создания изотопного генератора  $^{103}\text{Ru}/^{103\text{m}}\text{Rh}$

*В. А. Загрядский, К. О. Королев, Я. М. Кравец, А. В. Курочкин, А. Н. Стрелетов, Т. А. Удалова* 10

Установка для изучения взаимодействия быстрых нейтронов с легкими ядрами со спектрометром пар электронов и позитронов

*С. Х. Караевский, С. И. Поташев, Ю. М. Бурмистров, А. А. Каспаров, Е. А. Пермяков, В. Н. Пономарев, В. И. Разин* 18

Способ интегрального счета частиц в поперечном сечении пучка однородного излучения

*Д. Д. Богаченко, В. И. Силаев* 24

Оптимальный метод изучения космических лучей при сверхвысоких энергиях

*С. Б. Шаулов* 31

---

## ЭЛЕКТРОНИКА И РАДИОТЕХНИКА

Об особенностях измерений мощности оротронов двухмиллиметрового диапазона длин волн

*Е. А. Мясин, А. Ю. Ильин, Н. А. Максимов* 38

Генератор мощных импульсов с наносекундным фронтом на основе блоков динисторов с ударной ионизацией

*С. В. Коротков, А. Л. Жмодиков, К. А. Козлов, Д. А. Коротков* 42

---

## ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Методика исследования предпробойных явлений на катоде вакуумного промежутка

*Е. В. Нефедцев, С. А. Онищенко, П. П. Кизириди, Е. В. Яковлев, С. Г. Аникеев* 49

Импульсный ускоритель СПРУТ для задач радиационной стойкости

*Н. М. Вагина, В. Б. Бычков, С. А. Андреев, В. П. Шукайло, А. Е. Лыжин, Е. Н. Колосков, А. И. Негреев, Д. Д. Черноскулова, Е. Н. Ежов, А. В. Кузьмин* 57

Способ определения карты распределения магнитного поля в зазоре осесимметричного лабораторного электромагнита

*В. Н. Глазков, Д. А. Малиницкий, А. Х. Ряжапов*

64

Система автоматической настройки частоты резонансного контура ЯМР-датчиков Резонансье 2.2

*А. В. Гунбин, А. В. Ткачев, Н. Е. Гервиц*

72

---

## **ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

Применение инерциальной системы позиционирования для оценки координат и ориентации оптических модулей глубоководного нейтринного телескопа ВАКАЛ-GVD

*А. В. Аврорин, А. Д. Аврорин, В. М. Айнутдинов, В. А. Аллахвердян, З. Бардачова, И. А. Белолапников, Е. А. Бондарев, И. В. Борина, Н. М. Буднев, А. Р. Гафаров, К. В. Голубков, Н. С. Горшков, Т. И. Гресь, Р. Дворницки, Ж.-А. М. Джилкибаев, В. Я. Дик, [Г. В. Домогацкий], А. А. Дорошенко, А. Н. Дячок, Т. В. Елжов, Д. Н. Заборов, С. И. Завьялов, Д. Ю. Звездов, В. К. Кебкал, К. Г. Кебкал, В. А. Кожин, М. М. Колбин, С. О. Колигаев, К. В. Конищев, А. В. Коробченко, А. П. Кошечкин, М. В. Круглов, В. Ф. Кулепов, А. А. Куликов, Ю. Е. Лемешев, Р. Р. Миргазов, Д. В. Наумов, А. С. Николаев, Д. П. Петухов, И. А. Перевалова, Е. Н. Плисковский, М. И. Розанов, Е. В. Рябов, Г. Б. Сафронов, А. Э. Сиренко, А. В. Скурихин, А. Г. Соловьев, М. Н. Сороковиков, А. П. Стромаков, О. В. Суворова, В. А. Таболенко, В. И. Третьяк, Б. Б. Ульзутуев, В. Н. Фомин, И. Харук, Е. В. Храмов, В. А. Чадымов, А. С. Чепурнов, Б. А. Шайбонов, Ф. Шимковиц, Е. В. Широков, В. Ю. Шишкин, И. Штекл, Э. Эцкерова, Ю. В. Яблокова*

80

---

## **ЛАБОРАТОРНАЯ ТЕХНИКА**

Оптическая диагностика слабопоглощающих капель в нестационарных аэрозольных потоках

*А. Е. Варфоломеев, В. В. Пименов, А. А. Сабельников, Е. В. Черненко, А. О. Александров, Н. П. Зарецкий*

87

Автоматизированная установка импульсного нагрева проволочного зонда для определения критических свойств термически нестабильных веществ

*А. Н. Котов, Н. С. Богатищева, Г. В. Панов*

92

Минимизация проблем при создании двухфазных расходомеров для криогеники и их особенности. Часть I. Диагностика потоков гелия

*Ю. П. Филиппов, А. М. Коврижных, А. Ю. Филиппов*

96

Минимизация проблем при создании двухфазных расходомеров для криогеники и их особенности. Часть II. Диагностика потоков водорода и сжиженного природного газа

*Ю. П. Филиппов, А. М. Коврижных, А. Ю. Филиппов*

111

---

## **ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ В ЛАБОРАТОРИЯХ**

Мобильный многофункциональный комплекс для измерения шумовых характеристик полупроводниковых диодов

*А. В. Клюев, А. В. Якимов, А. В. Беляков*

127

Система сбора научной информации для применения в космических экспериментах

*Д. В. Лисин*

130

---

## **СИГНАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ**

Аннотации статей, намечаемых к публикации в журнале ПТЭ

132

---

---

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО  
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 621.3.038.616, 621.384.668

ВСТРАИВАЕМЫЙ КОНТРОЛЛЕР ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВАМИ  
УСКОРИТЕЛЬНО-НАКОПИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА СКИФ

© 2025 г. Д. А. Липовый<sup>a, b, \*</sup>, Д. В. Сеньков<sup>a</sup>, П. Б. Чеблаков<sup>a</sup>,  
А. В. Герасев<sup>a, b</sup>, С. Е. Карнаев<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup> *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11*

<sup>b</sup> *Центр коллективного пользования “Сибирский кольцевой источник фотонов”  
Института катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, 630559, Новосибирская обл., р. п. Кольцово, просп. Никольский, 1*

\* *e-mail: D.A.Lipovuy@inp.nsk.su*

Поступила в редакцию 10.12.2024 г.

После доработки 06.03.2025 г.

Принята к публикации 24.03.2025 г.

В синхротронах и накопителях заряженных частиц используется большое число устройств, обеспечивающих непрерывную циркуляцию пучков частиц по замкнутой траектории в вакуумной камере установки: это источники питания магнитной системы и генераторы высокой частоты. От источников питания магнитной системы требуется высокая точность и стабильность обработки заданных параметров (выходного тока или напряжения). Помимо этого, в случае управления состоянием установки с циркулирующими пучками (например, ускорение пучка в синхротроне) требуется также взаимная синхронизация обработки заданий всеми источниками питания. В настоящей работе представлено описание встраиваемого контроллера с аналоговым интерфейсом к управляемому устройству, обеспечивающего точность управления 100 ppm относительно полного диапазона обработки устройства и имеющего возможность синхронизации обработки по внешним тактовым импульсам, следующим с частотой до 10 кГц. Приведены примеры использования контроллера для управления различными устройствами и системами.

DOI: 10.31857/S0032816225030018

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Ускорительно-накопительный комплекс Центра коллективного пользования “Сибирский кольцевой источник фотонов” (СКИФ) состоит из инжектора электронного пучка, включающего линейный ускоритель (линак), рассчитанный на энергию 200 МэВ, бустерный синхротрон (бустер), ускоряющий частицы от 200 МэВ до 3 ГэВ, и каналы транспортировки пучка из линака в бустер и из бустера в накопитель, а также накопителя, рассчитанного на энергию электронов 3 ГэВ, на котором размещаются устройства для генерации синхротронного излучения (СИ).

Всего в составе ускорительно-накопительного комплекса насчитывается около 2500 управляе-

мых источников питания элементов магнитных систем, для разных типов которых требуется точность и стабильность обработки выходного тока, питающего магниты, в диапазоне от 1000 ppm до нескольких единиц ppm. К управлению источниками питания предъявляется много требований. Помимо необходимой точности, стабильности и воспроизводимости управления, должны быть обеспечены:

- синхронный мониторинг всех параметров источника питания [1], позволяющий непрерывно контролировать правильность одновременной работы множества устройств комплекса;
- синхронизация обработки задания, заранее записанного в память контроллера, позволяющая синхронно управлять перестройкой элементов магнитной системы;

- минимизация потока данных между контроллером и компьютерами системы управления;
- простая интеграция контроллера с программным обеспечением системы управления;
- возможность гибкой адаптации под новые задачи управления.

В связи с наличием недорогих малогабаритных систем на модуле (system on module, SoM), имеющих мощные процессоры (на которых может полноценно работать операционная система Linux), интерфейс Ethernet для подключения к сети системы управления, а также набор различных цифровых интерфейсов для подключения электронных компонентов, было принято решение на базе такого модуля разработать процессорно-интерфейсную плату (модуль) (ПИМ) [2], с помощью которой реализовать функции, удовлетворяющие перечисленным требованиям.

Для контроллеров, применяемых на СКИФ, была выбрана система на модуле, которая включает в себя процессор, состоящий из ядер различной архитектуры (четыре ядра общего назначения и ядро реального времени) и включающий различные периферийные устройства, в том числе порт Ethernet 1 Гб/с и энергонезависимую память. Более подробно структура SoM описана в работе [2].

Поскольку SoM, а также сетевое оборудование, используемое для подключения контроллеров к сети системы управления, относительно недороги, было принято решение разработать встраиваемый универсальный интерфейсный модуль с целью применения его индивидуально для каждого отдельного устройства, т.е. было решено не использовать многоканальные контроллеры, одновременно управляющие многими устройствами [3]. Такой подход радикально упрощает встроенное программное обеспечение (ПО), конфигурирование и интеграцию контроллеров в систему управления. Поскольку в модуле есть мощный универсальный процессор, в контроллере можно реализовать множество полезных онлайн-обработок измеренных сигналов для улучшения контроля управляемого устройства: различные усреднения и выборки, фурье-анализ и т.п.

Модуль ПИМ является универсальным интерфейсом между системой управления и частью контроллера, непосредственно взаимодействующей с силовой частью источника питания. Связь между ПИМ и силовой частью контроллера осуществляется через интерфейс SPI.

В нашей работе рассматривается одна из реализаций встраиваемого контроллера источников питания Module Power Supply Controller (MPSC). Контроллер предназначен для работы с источниками питания (или другими устройствами), для управления которыми требуется подача на их вход сигнала напряжения. На СКИФ от источников питания такого типа требуется стабильность отработки задания в пределах от 100 до 1000 ppm относительно полного размаха регулировки. Предполагается использовать несколько типов источников питания с таким управлением для элементов магнитных структур линака, бустера, каналов транспортировки пучка, а также для секступольных магнитов накопителя. Суммарное число таких контроллеров, применяемых на комплексе, более 400.

## 2. КОМПОНОВКА И РАЗМЕЩЕНИЕ КОНТРОЛЛЕРА

Контроллер выполнен в формате 3U (133.4 мм) шириной 4 HP (20.3 мм) и глубиной 160 мм. Внешний вид контроллера представлен на рис. 1.

Контроллер состоит из трех основных конструктивных элементов:

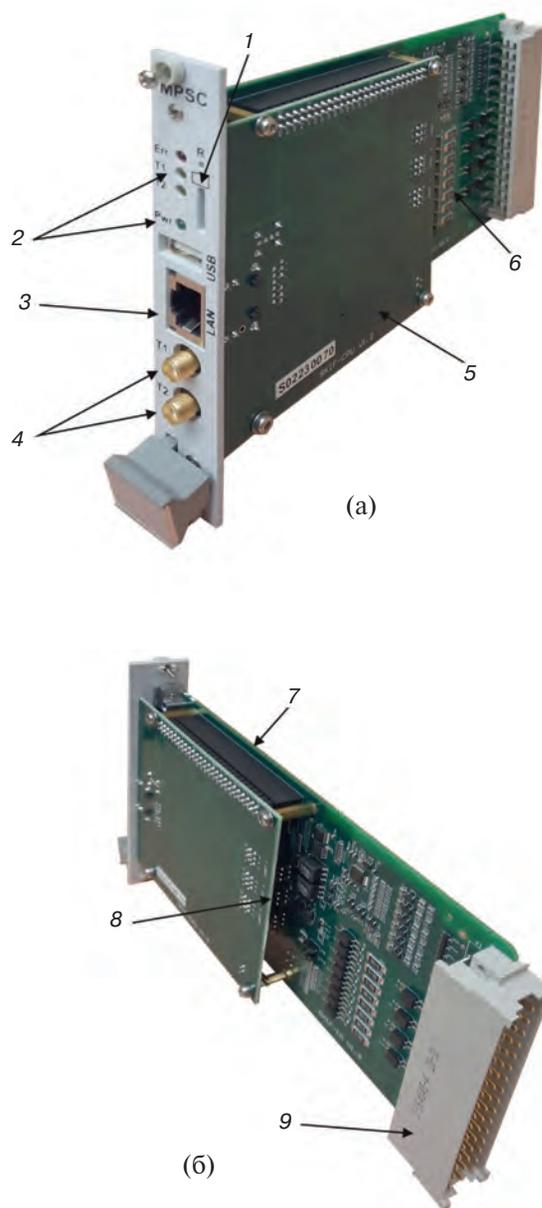
- основной аналоговой платы;
- модуля ПИМ на основной плате в виде мезонина;
- процессорного модуля SoM на плате ПИМ.

Основная плата реализует функции аналогового и цифрового ввода/вывода: через разъем DIN 41612, расположенный в задней части платы, она подключается к электронике источника питания. Модуль ПИМ содержит разъемы внешних цифровых интерфейсов и обеспечивает стыковку сигналов между SoM и основной платой.

Цифровые интерфейсы, слот мкSD и индикация размещаются на передней панели, которая закреплена на основной плате. Входы синхронизации, расположенные спереди, соединены с контактами на заднем разъеме, что позволяет подавать запуски и через задний разъем, а также выводить их в случае надобности на заднюю стыковочную плату.

Пример размещения контроллера в корпусе источника питания приведен на рис. 2.

Для управления источниками питания малой мощности, компактно размещенными в одной корзине, вставляемой в стандартную радиостойку размером 19 дюймов, разработана

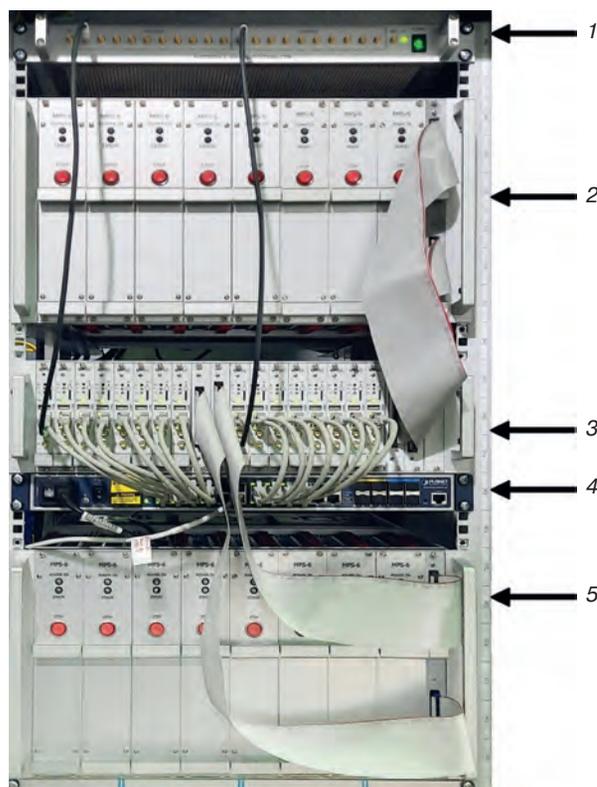


**Рис. 1.** Встраиваемый контроллер MPSC: **а** – вид спереди; **б** – вид сзади. 1 – слот для мкSD-карты, 2 – индикация работы, 3 – LAN-порт, 4 – входы синхронизации, 5 – плата ПИМ, 6 – аналоговая плата, 7 – разъем для подключения ПИМ, 8 – три порта UART, 9 – разъем для подключения к устройству.



**Рис. 2.** Пример размещения контроллера в корпусе источника питания.

соответствующая корзина управления, в которую можно установить до 16 контроллеров. Импульсы синхронизации вводятся через один из входов любого контроллера и через задний разъем распространяются на все контроллеры, вставленные в корзину. Пример компоновки корзины с контроллерами для управления шестнадцатью источниками питания, размещенными в двух корзинах, показан на рис. 3.



**Рис. 3.** Размещение контроллеров в специальной корзине: 1 – размножитель синхроимпульсов, 2 – корзина с источниками питания MPS-6, 3 – корзина с контроллерами, 4 – коммутатор для подключения контроллеров, 5 – корзина с источниками питания MPS-6.

### 3. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТРОЛЛЕРА

Спецификации на модуль ПИМ представлены в работе [2]. Основная аналоговая плата контроллера, на которую устанавливается ПИМ, состоит из нескольких подсистем.

#### 3.1. Подсистема ввода аналогового сигнала

В контроллере имеется шесть одинаковых каналов ввода аналогового сигнала, оцифровываемого с помощью дельта-сигма-АЦП ADS131M06IPBS (аналого-цифровой преоб-

разователь), имеющего следующие основные характеристики:

- диапазон измеряемого напряжения от  $-10\,000$  до  $+10\,000$  мВ;
- полоса частот по уровню 0.7 не менее 5 кГц;
- абсолютная погрешность измерений во всем диапазоне измерений не хуже  $\pm 2$  мВ;
- нелинейность во всем диапазоне измерений не хуже 1 мВ;
- температурный дрейф результата измерений не более  $\pm 10$  ppm/°C;
- уровень шума, измеряемый как P–P, не более 1.5 мВ при максимальном значении частоты дискретизации 10 кГц при количестве выборок 10 000;
- тип измерительного входа по каждому каналу дифференциальный, допустимое синфазное напряжение составляет  $\pm 20$  В.

Входные цепи измерительных каналов обеспечивают защиту от перенапряжений в диапазоне  $\pm 25$  В и от разрядов статического электричества.

АЦП работает на частоте 30 кГц. Для получения сигнала в момент прихода тактового импульса, поступающего от системы синхронизации с частотой 10 кГц, используется процедура аппроксимации. Для этой цели на основной плате установлен дополнительный микроконтроллер STM32F410CBU. Через него же обработанные измерения по Serial Peripheral Interface (SPI) попадают в модуль ПИМ.

Для достижения указанных параметров измерительных каналов выполняется процедура заводской калибровки. Полученные поправочные коэффициенты сохраняются в энергонезависимой памяти типа Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory (EEPROM).

### 3.2. Подсистема вывода аналогового сигнала

На аналоговой плате задействован одноканальный ЦАП (DAC80501ZDGS) со следующими характеристиками входного тракта:

- диапазон выходного сигнала от  $-10\,000$  В до  $+10\,000$  В;
- разрядность цифро-аналогового преобразования равна 16;
- абсолютная погрешность выходного напряжения во всем диапазоне не хуже  $\pm 2$  мВ, линейность 1 мВ, температурный коэффициент не более  $\pm 10$  ppm/°C, статический шум (RMS) напряжения на выходе не более 0.5 мВ;
- время установления выходного напряжения ЦАП при изменении задания ступенькой до

уровня 0.97 от величины заданного изменения – не более 10 мкс;

- нагрузочная способность выходных цепей не менее  $\pm 5$  мА, дифференциальное сопротивление на выходе не более 0.2 мВ/мА.

Предусмотрена защита от короткого замыкания в нагрузке, от скачка выходного напряжения при включении контроллера и защита выходов/входов от разрядов статического электричества.

Взаимодействие ПИМ с ЦАП так же, как и с АЦП, осуществляется через интерфейс SPI посредством ранее упомянутого микроконтроллера STM32F4.

Калибровка канала аналогового вывода осуществляется в процессе производства. Поправочные коэффициенты сохраняются в энергонезависимой памяти.

### 3.3. Подсистема дискретного ввода/вывода

В контроллере есть восемь каналов дискретного ввода и четыре канала дискретного вывода. Взаимодействие ПИМ с сигналами цепей дискретного ввода/вывода осуществляется через порты general-purpose input/output (GPIO):

- по всем каналам обеспечивается индивидуальная гальваническая изоляция с уровнем электрической прочности не менее 500 В постоянного напряжения в течение 1 мин;
- напряжение срабатывания дискретного входа не более 3 В, допустимый диапазон входного тока от 3 до 15 мА; при входном напряжении более 9 В ограничение входного тока на уровне 15 мА должно обеспечиваться внешним сопротивлением;
- выходная дискретная цепь – коммутатор на базе твердотельного реле, обеспечивающий управляемое состояние “замкнуто/разомкнуто”, сопротивление выхода в состоянии “замкнуто” не более 25 Ом, в состоянии “разомкнуто” не менее 1 МОм, максимальное рабочее напряжение, коммутируемое выходом, 120 В, ток составляет не менее 100 мА.

### 3.4. Синхронизация контроллера

Подсистема синхронизации контроллера получает синхроимпульсы от системы управления СКИФ, что обеспечивает синхронную работу всех контроллеров, образующих распределенную систему. Подсистема синхронизирует

работу всех компонентов и встроенного ПО внутри контроллера.

На контроллер подается два синхроимпульса, функции которых определяются программным обеспечением [2]. В случае СКИФ – это импульсы с частотой повторения 10 кГц и 1 Гц. Импульсы частотой 10 кГц задают частоту обработки ЦАП и АЦП, а импульсы частотой 1 Гц определяют цикличность заполнения массивов с измерениями по всем каналам и их передачи в управляющий компьютер, а также задают старт отработки контроллером массива заданий, заранее записанного в его память. Предусмотрена оперативная возможность переключения источника синхроимпульсов с внешнего на внутренний.

Номинальное значение длительности внешних импульсов синхронизации положительной полярности 1 мкс, длительность фронта не более 0.1 мкс. Цепи подключения синхроимпульсов обеспечивают индивидуальную гальваническую развязку от прочих цепей контроллера с электрической прочностью изоляции не менее 1500 В постоянного напряжения в течение 1 мин. Номинальное значение амплитуды входного импульса составляет +3 В, логическому уровню “1” соответствует значение напряжения более 2 В. Входы синхроимпульсов защищены от импульсов отрицательной полярности.

Сопrotivления входов синхроимпульсов конфигурируются с помощью переключателей типа “джампер” и принимают значения 10 кОм и 50 Ом.

Сигналы синхронизации заводятся на порты GPIO модуля ПИМ и обрабатываются системой реального времени, работающей на процессоре в SoM [2].

### 3.5. Питание контроллера

Контроллер питается от постоянного напряжения в диапазоне от 12 до 36 В. Контроллер не имеет гальванической развязки по цепям питания, необходимые изоляционные барьеры обеспечиваются на уровне подсистем. Входные цепи питания обеспечивают защиту от импульсных перенапряжений и инверсии полярности напряжения, а также содержат элементы защиты от токов короткого замыкания, исключающие перегрузку источника питания при возникновении неисправностей в блоке контроллера.

Потребляемая контроллером мощность по цепям питания не превышает 5 Вт.

## 4. ИНТЕРФЕЙСЫ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Программное обеспечение системы управления СКИФ базируется на EPICS [4] – программной платформе, которая широко используется в мире для создания систем управления ускорительными комплексами. Ядром EPICS является серверная программа Input-Output Controller (IOC), которая взаимодействует с оборудованием и предоставляет данные в системе в виде сетевых переменных, доступных по протоколу CA (Channel Access) [4].

Детально встроенное ПО описано в работе [2]. Блок-диаграмма основных узлов и интерфейсов, включая программные интерфейсы, показана на рис. 4.

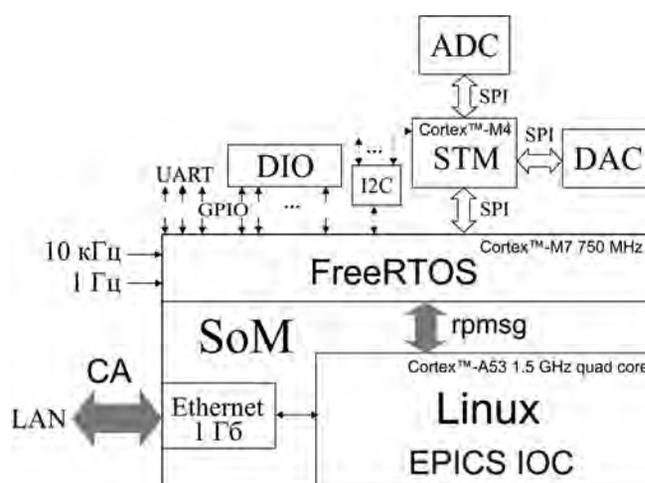


Рис. 4. Блок-диаграмма интерфейсов контроллера.

Программное обеспечение для работы с контроллером содержит три части:

- встроенное ПО реального времени, работающее под управлением операционной системы FreeRTOS в процессоре реального времени Cortex M7;
- серверное ПО, работающее под операционной системой Linux в процессоре общего назначения Cortex A53, выполняющее обработку данных и предоставляющее системе данные в виде сетевых переменных, к которым возможен доступ из других приложений;
- клиентские инженерные и операторские приложения, работающие в компьютерах системы управления, взаимодействующие с контроллером через его сетевые переменные.

Поскольку в SoM работает IOC, автоматически обеспечивается полная интеграция контроллера в систему управления. Использо-

ние процессора реального времени позволяет эффективно осуществлять синхронную работу с аналоговыми компонентами контроллера. Обмен данными между процессором реального времени и процессором общего назначения осуществляется с помощью протокола межъядерного обмена Remote Processor Messaging (RPMsg). В процессоре общего назначения выполняется онлайн-обработка измерений, что позволяет разгрузить сеть системы управления от передачи “сырых” данных, т.е. проводятся:

- усреднение по заданному параметру значений, измеренных с частотой 10 кГц, что во многих случаях позволяет подавить случайные шумы и повысить точность измерений;
- преобразование Фурье для выявления гармоник пульсаций;
- поточечное сравнение измерений отработанного значения с заданием (мониторинг), при котором в случае обнаружения недопустимых отклонений контроллер выставляет программный сигнал об ошибке для управляющих приложений, работающих в компьютерах системы управления.

Использование синхросигналов, поступающих на контроллер, позволяет отслеживать обработку устройствами выходных параметров

в заданный момент, например во время пролета пучка по каналу транспортировки.

На рис. 5 показан пример контроля отработки источником питания синусоиды амплитудой 1.5 А и частотой 2 Гц. На увеличенном фрагменте видны недопустимые пульсации тока амплитудой 50 мА, по поводу чего контроллер выставляет сигнал для управляющего приложения.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время изготовлено и настроено 450 контроллеров, что достаточно для управления всеми соответствующими устройствами ускорительного комплекса СКИФ. Разработано встроенное ПО контроллера, и в процессе запуска инжекционного комплекса ведется его отладка. Созданы инженерные приложения для управления источниками питания линака, выполняются отладка алгоритмов управления и разработка программ управления для источников питания магнитной системы бустерного синхротрона.

Кроме СКИФ, рассматриваемый контроллер предполагается применить для управления магнитными системами на ускорительно-накопительном комплексе ВЭПП-4 в ИЯФ СО РАН.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ЦКП “СКИФ” ИК СО РАН (FWUR-2024-0041).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бехтенов Е.А., Карпов Г.В., Чеблаков П.Б., Герасев А.В., Карнаев С.Е., Липовый Д.А. // Письма в ЭЧАЯ. 2024. Т. 21. № 3. С. 492.
2. Герасев А.В., Карнаев С.Е., Липовый Д.А., Чеблаков П.Б. // Материалы RuPAC'23. Новосибирск, 2023.
3. Cheblakov P.B., Karnaev S.E., Gerasev A.V., Senkov D.V. // Proc. ICALEPCS'19. NY, USA. 2020. P 1145.  
<https://doi.org/10.18429/JACoW-ICALEPCS2019-WEPHA028>
4. [https://epics.anl.gov/base/;](https://epics.anl.gov/base/)  
[https://docs.epics-controls.org/en/latest/specs/ca\\_protocol.html](https://docs.epics-controls.org/en/latest/specs/ca_protocol.html)

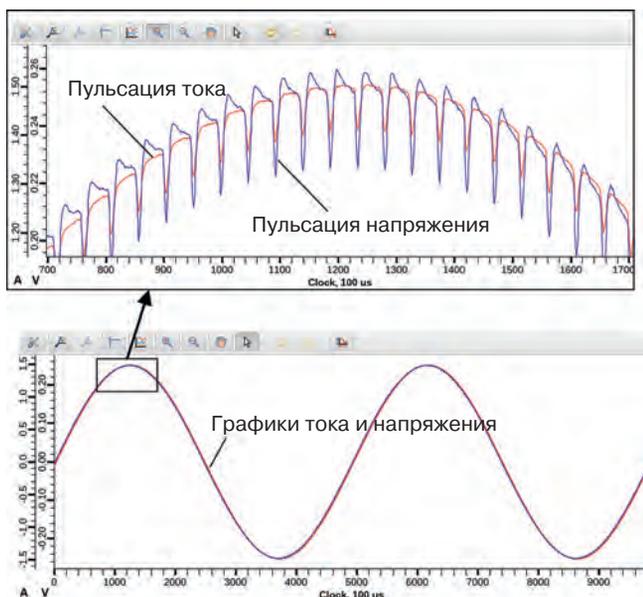


Рис. 5. Осциллографические измерения выходных параметров источника питания: тока в нагрузке и выходного напряжения.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ СОЗДАНИЯ ИЗОТОПНОГО ГЕНЕРАТОРА $^{103}\text{Ru}/^{103\text{m}}\text{Rh}$

© 2025 г. В. А. Загрядский<sup>а</sup>, К. О. Королев<sup>а</sup>, Я. М. Кравец<sup>а</sup>, А. В. Курочкин<sup>а</sup>,  
А. Н. Стрепетов<sup>а</sup>, Т. А. Удалова<sup>а,\*</sup>

<sup>а</sup> *Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”  
Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1*

\* *e-mail: udalova\_ta@nrcki.ru*

Поступила в редакцию 27.11.2024 г.

После доработки 11.02.2025 г.

Принята к публикации 25.02.2025 г.

Для разработки изотопного генератора  $^{103}\text{Ru}/^{103\text{m}}\text{Rh}$  проводилось реакторное получение и идентификации радиоизотопа  $^{103}\text{Ru}$ . Отработаны методики синтеза и дистилляции высоколетучего  $\text{RuO}_4$  из металлического рутения и из растворов, продемонстрирован эффект очистки  $\text{RuO}_4$  от сопутствующих радионуклидных примесей при дистилляции, а также возможность разделения рутения и целевого радиоизотопа  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  методом термической отгонки  $\text{RuO}_4$ .

DOI: 10.31857/S0032816225030024

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время и в нашей стране, и за рубежом большое внимание уделяется разработкам и внедрению таргетных терапевтических препаратов, основанных на использовании оже-эмиттеров и конверсионных электронов в качестве терапевтических агентов, позволяющих уничтожать раковые клетки, минимизируя побочные радиологические эффекты. Оже-эмиттеры и конверсионные электроны имеют малый пробег и высокую удельную линейную потерю энергии, они способны повреждать раковые клетки в пределах нескольких десятков микрон, но не оказывают цитотоксического действия на больших расстояниях, не повреждая здоровые клетки и ткани.

Радиоизотоп  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  по праву относят к наиболее эффективным, безопасным и удобным для практического применения оже-эмиттерам и конверсионных электронов [1–3]. У него наименьшее отношение числа  $\gamma$ -квантов к числу электронов, и он может быть получен генераторным способом. Предшественниками  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  ( $T_{1/2} = 56.1$  мин) в генераторе могут быть  $^{103}\text{Ru}$  ( $T_{1/2} = 39.25$  сут.) или  $^{103}\text{Pd}$  ( $T_{1/2} = 16.99$  сут.).

Использование в качестве предшественника  $^{103}\text{Ru}$  более предпочтительно в связи с большим периодом полураспада и возможностью в качестве стартового материала при его наработке по реакции  $^{102}\text{R}(n, \gamma)^{103}\text{Ru}$  использовать природный рутений, в котором содержание изотопа  $^{102}\text{Ru}$  составляет 31.6%, в то время как при наработке  $^{103}\text{Pd}$  по реакции  $^{102}\text{Pd}(n, \gamma)^{103}\text{Pd}$  необходимо использовать высокообогащенный изотоп  $^{102}\text{Pd}$ , содержание которого в природной смеси изотопов не превышает 1%. Рисунок 1 иллюстрирует цепочку генераторного получения и последующего распада радиоизотопа  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  с предшественником  $^{103}\text{Ru}$ .



Рис. 1. Схема наработки и изомерного перехода целевого радиоизотопа  $^{103\text{m}}\text{Rh}$ .

Учитывая изложенное, задача создания изотопного генератора  $^{103}\text{Ru}/^{103\text{m}}\text{Rh}$  представляется весьма актуальной. В нашей статье описана техника реакторного получения и идентификации радиоизотопа  $^{103}\text{Ru}$ , отработаны методики

синтеза и дистилляции высоколетучего  $\text{RuO}_4$  из металлического рутения и из растворов, продемонстрирован эффект очистки  $\text{RuO}_4$  от сопутствующих радионуклидных примесей при дистилляции. Продемонстрирована возможность разделения рутения и целевого радионуклида  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  методом термической отгонки  $\text{RuO}_4$ .

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 2.1. Получение радионуклида $^{103}\text{Ru}$ и идентификация $^{103}\text{Ru}$ и $^{103\text{m}}\text{Rh}$

Для получения радиоактивного  $^{103}\text{Ru}$  порошок губчатого металлического рутения массой 46 мг природного состава облучался в течение суток потоком тепловых нейтронов с мощностью порядка 5 МВт в горизонтальном экспериментальном канале реактора ИР-8 НИЦ “Курчатовский институт”. Гамма- и рентгеновские спектры облученного образца были получены с помощью соответствующих спектрометров: гамма-спектрометра ORTEC GEM 35P4 и рентгеновского спектрометра фирмы ORTEC GLP 25325/10 (США) с детекторами из сверхчистого германия.

Активность  $^{103}\text{Ru}$  определялась по измерениям наиболее интенсивной гамма-линии  $^{103}\text{Ru}$  с энергией  $E_\gamma = 497$  кэВ на  $\gamma$ -детекторе ORTEC. Фрагменты инструментальных гамма-спектров облученного образца рутения через четыре месяца после облучения и синтезированного из него  $\text{RuO}_4$  представлены на рис. 2.

После конверсии облученного  $\text{Ru}$  в сконденсированный кристаллический  $\text{RuO}_4$  линии примесного  $^{192}\text{Ir}$  в гамма-спектре не наблюдались.

Поскольку целевой изотоп  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  не имеет линий в гамма-диапазоне, измерение его активности проводилось с помощью X-гау спектрометра ORTEC в области энергий 20.15 кэВ, где рентгеновские линии  $^{103}\text{Ru}$  и  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  перекрываются. При установленном в системе равновесии вклады от  $^{103}\text{Ru}$  и  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  в перекрывающийся пик полного поглощения в области энергий 20 кэВ определялись по измеренному суммарному пику в долях пропорционально их квантовым выходам. Квантовые выходы  $^{103}\text{Ru}$  и  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  в области энергий 20 кэВ составляют 7.22 и 6.27% соответственно [4].

### 2.2. Синтез $\text{RuO}_4$ из металлического $\text{Ru}$

Методика конверсии металлического  $\text{Ru}$  в  $\text{RuO}_4$  разрабатывалась на необлученных промышленных образцах губчатого рутения.

Ожидаемые преимущества разрабатываемого генератора состоят в простоте эксплуатации, большом сроке работы без дозаправки и автоматической очистке рутения от радионуклидных примесей, которые нарабатываются при облучении, но не переходят в газовую фазу при конверсии  $\text{Ru}$  в  $\text{RuO}_4$ .

Оксид рутения  $\text{RuO}_4$ (VIII) – неорганическое соединение в виде желто-оранжевых кристаллов, умеренно растворимых в воде и образующих гидраты [5]. По измерениям зависимости  $P(T)$  четырехоксида рутения [6] давление насыщенного пара составляет 8.6 мм рт. ст. при температуре 22 °С. Разложение  $\text{RuO}_4$  происходит при контакте с влагой при повышенных температурах и под воздействием света.

В работах [7, 8] наиболее совершенным методом синтеза  $\text{RuO}_4$  названа отгонка четырехоксида рутения из сернокислой среды с периодатом калия  $\text{KIO}_4$  в качестве окислителя.

Обобщенно эта реакция представляется уравнением

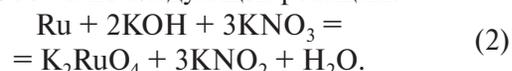


Однако с заметным выходом она может быть осуществлена только в несколько стадий, включающих предварительное окисление  $\text{Ru}$  в растворе щелочи до  $\text{RuO}_4^{2-}$  и последующую дистилляцию  $\text{RuO}_4$  из раствора выдуванием его нейтральным газом.

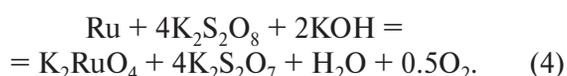
**2.2.1. Конверсия металлического  $\text{Ru}$  в растворимую соль  $\text{K}_2\text{RuO}_4$ .** Первым этапом превращения металлического  $\text{Ru}$  в  $\text{RuO}_4$  является перевод  $\text{Ru}$  в растворимую форму рутената калия  $\text{K}_2\text{RuO}_4$ .

Для достижения этой цели было опробовано два способа.

1. Синтез  $\text{K}_2\text{RuO}_4$  из исходного  $\text{Ru}$  окислением его в расплаве  $\text{KOH}$  и  $\text{KNO}_3$  при температуре 400–500 °С по следующей реакции:



2. Синтез  $\text{K}_2\text{RuO}_4$  окислением  $\text{Ru}$  непосредственно в растворе  $\text{KOH}$  по следующим реакциям:



Для контроля  $\text{K}_2\text{RuO}_4$  в растворах, синтезируемого по реакциям (2)–(4), проводились измерения спектров поглощения в диапазоне длин волн 220–1000 нм на приборе

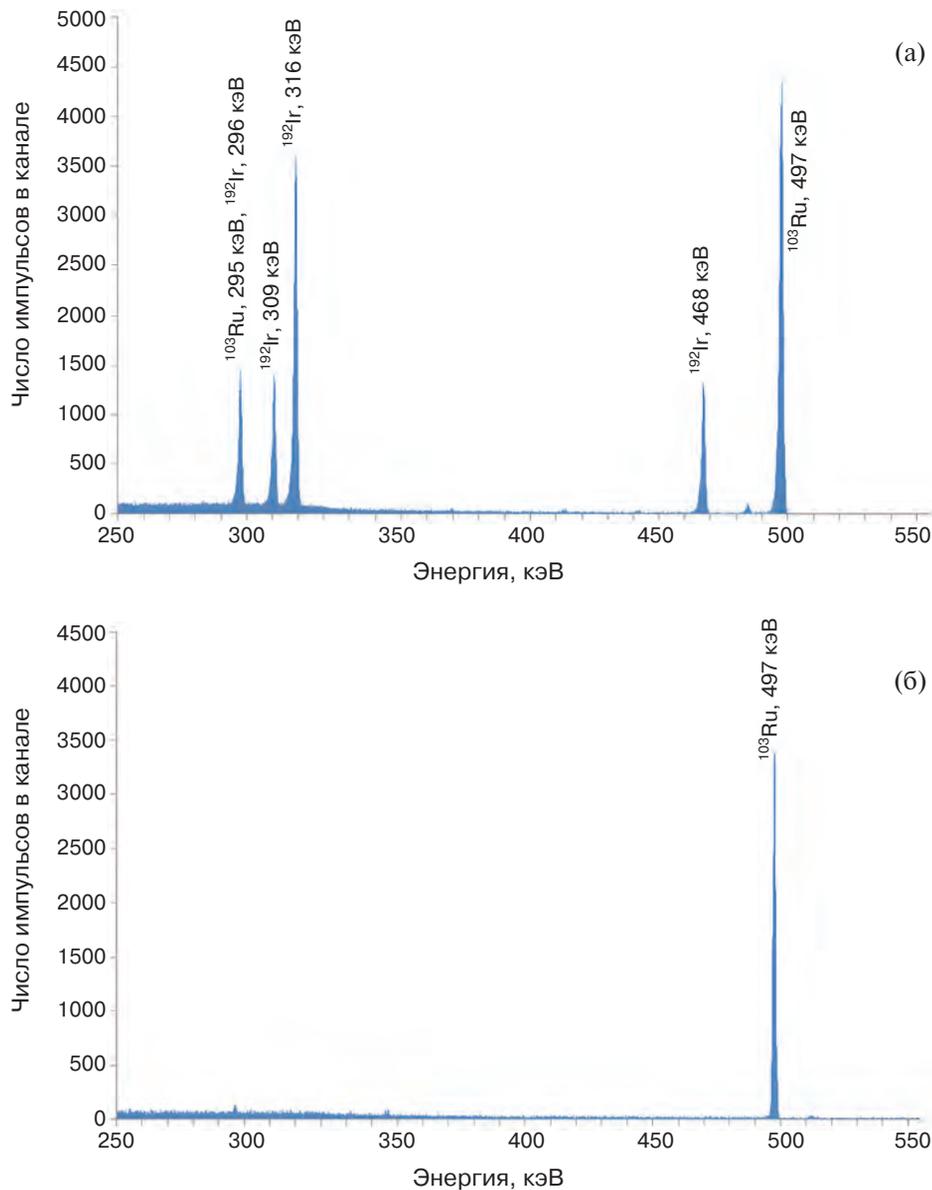


Рис. 2. Фрагменты аппаратных гамма-спектров  $^{103}\text{Ru}$ : а – облученного образца металлического Ru нейтронами через четыре месяца после облучения; б – кристаллов  $^{103}\text{RuO}_4$ , полученных конверсией металлического  $^{103}\text{Ru}$ .

SPECTROstar<sup>®</sup>Nano (Германия). Необходимые данные по коэффициентам экстинкции были взяты из обстоятельной работы [9] по спектроскопии растворов рутения, согласно которым ион  $\text{RuO}_4^{2-}$  [Ru(VI)] при  $\lambda = 465$  нм имеет коэффициент экстинкции  $\varepsilon = 1820 \text{ л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  (рис. 3), а молекула  $\text{RuO}_4$ , Ru(VIII) при  $\lambda = 385$  нм –  $\varepsilon = 930 \text{ л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ .

Количественные измерения  $\text{K}_2\text{RuO}_4$  в получаемых растворах проводились следующим образом. Из синтезированного раствора отбирались дозированные пробы объемом несколько микролитров, которые вводились в оптическую кварцевую кювету с нейтральным растворителем

(дистиллятом или KOH), после чего по измеряемой оптической плотности  $\tau$  при длине волны  $\lambda = 465$  нм и известному для иона  $\text{RuO}_4^{2-}$  коэффициенту экстинкции  $\varepsilon$  (рис. 3) рассчитывалась масса растворенного  $\text{K}_2\text{RuO}_4$  и Ru:

$$m_{\text{Ru(VI)}} = \frac{V_{\text{кюв}} \cdot V_{\text{раств}}}{V_{\text{проб}} \cdot L_{\text{раств}}} \cdot \frac{\tau_{465}}{\varepsilon_{465}} \cdot \mu_{\text{Ru}}, \quad (5)$$

где  $m_{\text{Ru(VI)}}$  [мг] – масса Ru(VI) в исследуемом растворе;  $V_{\text{кюв}}$  [л] – объем оптической кюветы;  $V_{\text{раств}}$  [л] – объем исследуемого раствора, из которого взята проба;  $V_{\text{проб}}$  [л] – объем пробы;  $L_{\text{раств}}$  [см] – толщина слоя раствора в оптической кювете;  $\tau_{465}$  [отн. ед.] – измеренная оптическая

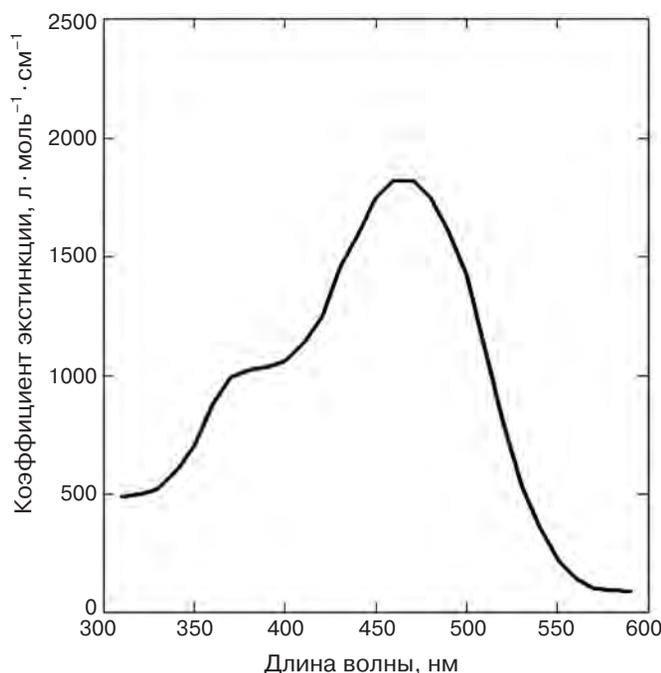


Рис. 3. Молярный коэффициент экстинкции иона  $\text{RuO}_4^{2-}$  [Ru(VI)] как функция длины волны (по данным работы [9]).

плотность;  $\epsilon_{465}$  [л·моль<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup>] — коэффициент экстинкции аниона  $\text{RuO}_4^{2-}$ ;  $\mu_{\text{Ru}}$  [а.е.м.] — атомный вес Ru.

Контроль получаемых растворов в течение продолжительного времени показал, что концентрация  $\text{K}_2\text{RuO}_4$  в щелочных растворах молярностью более 2М остается стабильной не менее двух недель.

**Реакция (2).** Синтез рутената калия по реакции (2) в расплаве удовлетворительно воспроизводился по известной методике [10], и спектр его раствора соответствовал литературным данным. Согласно спектрофотометрическим измерениям, выход  $\text{K}_2\text{RuO}_4$  составил 80%.

**Реакция (3).** Синтез  $\text{K}_2\text{RuO}_4$  в растворе по реакции (3) проводился в стеклянном бюксе, помещенном в нагреваемый термостат, в интервале температур 70–90 °С в течение двух часов при непрерывном перемешивании с помощью магнитной мешалки. Как было установлено по спектрам поглощения, в получаемых растворах образовывалась рассеивающая мелкодисперсная взвесь, по-видимому  $\text{KIO}_3$ , которую не удавалось устранить даже с помощью центрифуги на частоте 10<sup>4</sup> об/мин. Это приводило к искажению формы спектров  $\text{K}_2\text{RuO}_4$  и невозможности определять по ним концентрацию.

**Реакция (4).** Для синтеза  $\text{K}_2\text{RuO}_4$  в растворе по реакции (4) был опробован другой окислитель Ru — пероксидисульфат калия  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ , растворимость которого в воде при температуре 20 °С составляет 4.49 г/100 мл, в то время как растворимость  $\text{KIO}_4$  — лишь 0.42 г/100 мл.

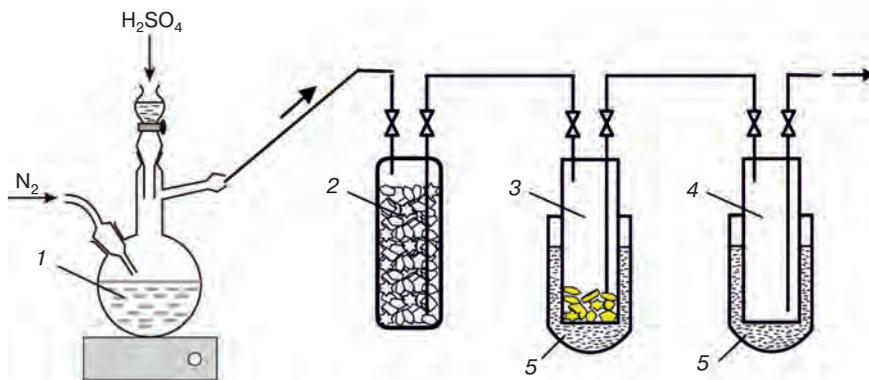
По литературным данным температура разложения  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$  составляет менее 100 °С, поэтому при проведении реакции окисления Ru персульфатом калия температура нагрева была понижена. Синтез проводился в таком же стеклянном бюксе в течение 2 ч при температуре 55–60 °С при непрерывном перемешивании. В этих условиях удалось получить полноценные спектры  $\text{K}_2\text{RuO}_4$  и путем варьирования относительных количеств реагентов подобрать условия максимального выхода Ru в раствор, который составил в итоге 78%.

Несмотря на столь же высокий выход  $\text{K}_2\text{RuO}_4$  по реакции (2), получение  $\text{K}_2\text{RuO}_4$  по реакции (4) оказалось более удобным, так как для проведения реакции (2) в расплаве требуются достаточно длительные манипуляции с радиоактивным порошком Ru (перемешивание с  $\text{KNO}_3$ , поэтапное добавление этой смеси в расплав КОН и последующее ее растворение).

**2.2.2. Синтез и дистилляция  $\text{RuO}_4$  из раствора.** Для реализации подхода, включающего отгонку  $\text{RuO}_4$  из раствора, был собран специальный стенд (рис. 4). Приведенная в работах [7, 8] схема газового стенда для наработки  $\text{RuO}_4$  не отвечала требованиям нашей задачи.

Прежде всего, разборный стеклянный газовый стенд не обеспечивал достаточную герметичность без применения вакуумной смазки (активно взаимодействующей с  $\text{RuO}_4$ ), а также не позволял провести высокое обезвоживание осушителя газов ангидрона  $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$ . Поэтому при изготовлении стенда использовались детали, выполненные из нержавеющей стали и дюралялюминия. В качестве соединяющих элементов между стеклом и металлом в первых экспериментах применялись трубки из полиэтилена и полипропилена. Однако из-за взаимодействия  $\text{RuO}_4$  с внутренними поверхностями таких трубок (что проявлялось в их почернении), они были заменены на трубки из фторопласта ПТФЭ. Стеклодержатель оставалась только перегонная “трехгорлая” колба 1 (рис. 4), шлифы которой смазывались серной кислотой.

Реакционная смесь в колбе непрерывно перемешивалась магнитной мешалкой, якорь кото-



**Рис. 4.** Схема газового стенда для синтеза и дистилляции  $\text{RuO}_4$ : 1 – перегонная колба с  $\text{KIO}_4$  и раствором  $\text{K}_2\text{RuO}_4$ , сверху на колбе расположена воронка для капельного введения  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , под колбой – магнитная мешалка; 2 – колонка с осушителем газов ангидроном  $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$ ; 3 – металлическая прокатная ловушка-сборник  $\text{RuO}_4$ ; 4 – вспомогательная прокатная ловушка, предотвращающая конденсацию влаги из атмосферы в сборник  $\text{RuO}_4$  при выключении потока азота; 5 – сосуды Дьюара с этилцеллозольвом ( $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}_2$ ) при температуре  $-78^\circ\text{C}$ .

рой имел защитное покрытие из фторопласта. Ловушки 2–4 (рис. 4) были снабжены вентилями из нержавеющей стали. В качестве охлаждающей смеси использовался жидкий этилцеллозольв ( $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}_2$ ), который поддерживался при температуре  $-78^\circ\text{C}$  путем периодического подливания жидкого азота.

Перенос  $\text{RuO}_4$  из реакционной колбы в ловушки-сборники осуществлялся потоком азота высокой чистоты из стандартного баллона объемом 40 л, расход задавался регулятором РРГ-10. Использование магнитной мешалки позволило отказаться от погружения подводящей газ трубки непосредственно в реакционную смесь во избежание потерь  $\text{Ru}$  из-за разбрызгивания раствора и осаждения капель на стенках колбы.

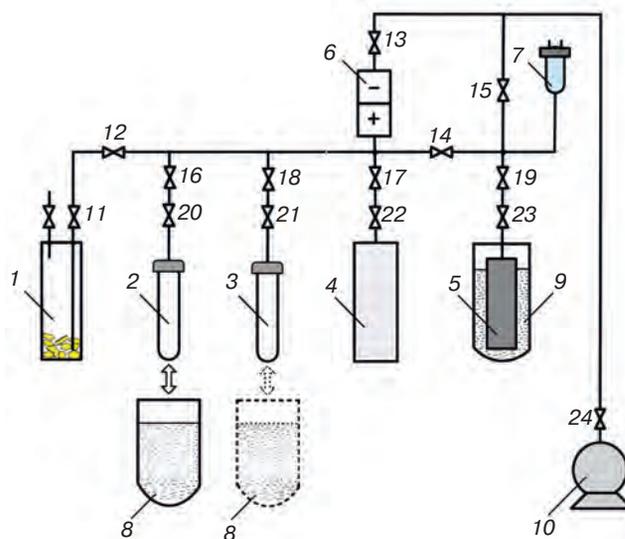
Процесс наработки и дистилляции  $\text{RuO}_4$  проводился при комнатной температуре. Он состоял в следующем:

- в перегонную колбу помещался порошок  $\text{KIO}_4$  в количестве 1–1.5 г;
- с помощью регулятора устанавливался расход азота ( $q = 10$  л/ч);
- в колбу вливался раствор  $\text{K}_2\text{RuO}_4$  в КОН (молярностью 4М) объемом 12–17 мл;
- из делительной воронки в раствор капельно добавлялась концентрированная  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

Длительность эксперимента по наработке и отгонке  $\text{RuO}_4$  не превышала двух часов. По мере увеличения концентрации  $\text{H}_2\text{SO}_4$  цвет раствора и порошка  $\text{KIO}_4$  на дне колбы из красно-коричневого становился желтым и постепенно бледнел к концу второго часа, вплоть до полного обесцвечивания. Отгоняемый  $\text{RuO}_4$

пропускался через осушитель 2 (рис. 4) и конденсировался в металлической ловушке-сборнике 3 (рис. 4), которая по окончании процесса переносилась на вакуумный стенд (рис. 5).

После завершения отработки методики конверсии  $\text{Ru}$  в  $\text{RuO}_4$  на необлученном металлическом рутении целевые операции – последовательные превращения  $\text{Ru}$  в  $\text{K}_2\text{RuO}_4$  и  $\text{K}_2\text{RuO}_4$  в  $\text{RuO}_4$  – проводились на облученных образцах.



**Рис. 5.** Схема вакуумного стенда для операций по выделению  $^{103\text{m}}\text{Rh}$ : 1 – металлическая ловушка с синтезированным  $^{103}\text{RuO}_4$ ; 2 – кварцевая емкость с металлическим фланцем; 3 – кварцевая емкость с металлическим фланцем; 4 – мерная емкость; 5 – сорбционная ловушка с активированным углем; 6 – датчик давления ДТ-5; 7 – термоэлектронный датчик давления; 8, 9 – сосуды Дьюара с жидким азотом; 10 – форвакуумный насос; 11–24 – вентили.

2.3. Выделение  $^{103m}\text{Rh}$  при отгонке  $\text{RuO}_4$

Вакуумный стенд, схема которого представлена на рис. 5, предназначен для перегонки синтезированного  $\text{RuO}_4$  в небольшие пригодные для хранения емкости для оценки количества собранного  $\text{RuO}_4$  и, прежде всего, выделения нарабатываемого  $^{103m}\text{Rh}$ . Извлечение  $^{103m}\text{Rh}$  проводилось путем его смыва со стенок кварцевых ловушек после выдерживания в них  $^{103}\text{RuO}_4$  и последующей его отгонки.

Емкости для операций с  $\text{RuO}_4$  представляли собой ампулы из плавленого кварца 2, 3 (рис. 5) с внутренним диаметром 10 мм и длиной 20 см, снабженные металлическими фланцами и надежными вентилями (с уплотнением металл по металлу). Использование таких емкостей обусловлено химической стойкостью кварца по отношению к кислотам, используемым при последующем растворении образующегося  $^{103m}\text{Rh}$ , а также прозрачностью кварца для наблюдения за локализацией  $\text{RuO}_4$ .

Поскольку  $\text{RuO}_4$  требует особо тщательного обращения, так как подвержен разложению при повышении температуры, в присутствии паров воды и под действием света, перед использованием кварцевые емкости тщательно герметизировали и дегазировали при температуре 200 °С в течение одного часа. После переконденсации свеже синтезированного  $\text{RuO}_4$  из металлической ловушки-сборника 1 (рис. 5) в кварцевую ловушку 2 (рис. 5), последняя закрывалась светонепроницаемым экраном и помещалась в морозильную камеру при температуре -22 °С. При соблюдении этих мер предосторожности

величина относительных потерь  $\text{RuO}_4$  в результате его химического разложения составляла примерно 0.4 вес. % за 10 сут. хранения.

Количество собранного  $\text{RuO}_4$ , полученного из облученного образца металлического Ru весом 46 мг, определялось по измерению его давления. Для этого свеже синтезированный  $\text{RuO}_4$  собирался в кварцевую емкость 3 (рис. 5), которая отогревалась до температуры 20 °С, после чего газообразный  $\text{RuO}_4$  распускался в известный объем гребенки, включающий мерную емкость 4 (рис. 5). Максимальное давление  $\text{RuO}_4$  при распускании составило 6.2 мм рт. ст. (рис. 6), что позволило рассчитать массу  $\text{RuO}_4$  в приближении идеального газа по следующей формуле:

$$m_{\text{RuO}_4} = \frac{P_{\text{RuO}_4} \cdot 3.3 \cdot 10^{19} \cdot V_{\text{RuO}_4}}{N_A} \cdot \mu_{\text{RuO}_4}, \quad (6)$$

где  $m_{\text{RuO}_4}$  [г] – масса  $\text{RuO}_4$ ;  $P_{\text{RuO}_4} = 6.2$  [мм рт. ст.] – давление  $\text{RuO}_4$ ;  $3.3 \cdot 10^{19}$  [мм рт. ст. $^{-1}$ ·л $^{-1}$ ] – число молекул в одном литре газа при давлении 1 мм рт. ст. (при температуре 20 °С);  $V_{\text{RuO}_4} = 1.126$  [л] – объем газообразного  $\text{RuO}_4$ ;  $N_A = 6.022 \cdot 10^{23}$  [моль $^{-1}$ ] – число Авогадро;  $\mu_{\text{RuO}_4} = 165$  [г/моль] – молярная масса  $\text{RuO}_4$ ;  $\mu_{\text{Ru}} = 101$  [а. е. м.] – атомная масса Ru.

Согласно расчету, масса собранного в ловушке  $\text{RuO}_4$  составила 63 мг, масса Ru в котором 38.6 мг. Таким образом, при переработке облученного образца металлического рутения массой 46 мг в  $\text{RuO}_4$  выход Ru составил примерно 84%.

Следует отметить, что одним из возможных перспективных путей использования синтези-

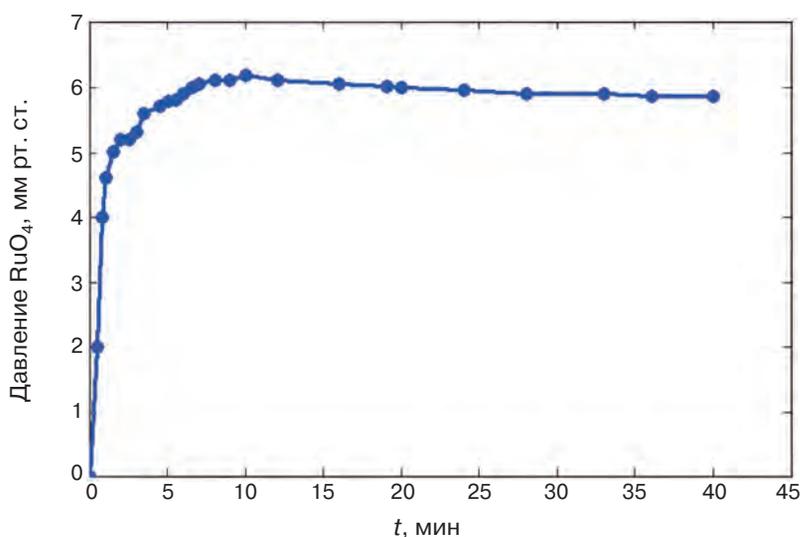


Рис. 6. Установление давления газовой фазы  $\text{RuO}_4$  при распускании на мерный объем.

рованного  $\text{RuO}_4$  является формирование растворов комплексных соединений рутения, пригодных для извлечения дочернего  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  методом ионообменной хроматографии. Поскольку в силу своей высокой химической активности  $\text{RuO}_4$  легко поглощается растворами кислот и щелочей, открывается возможность путем изменения состава растворителя, через который

проводится его барботирование, получать такие соединения Ru, которые надежно удерживались бы на используемом сорбенте. Наличие в литературе количественных данных о молекулярных абсорбционных спектрах комплексов рутения [11] и родия [12] облегчает проведение поиска оптимальных растворителей для их разделения с помощью ионообменной хроматографии.

Процедура выделения  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  из  $\text{RuO}_4$  выполнена следующим образом. Активность  $^{103}\text{Ru}$  в ловушке с кристаллами  $\text{RuO}_4$  измерялась по интенсивной гамма-линии  $E_\gamma = 497$  кэВ до и после отгонки  $\text{RuO}_4$ . Ее длительность составила 15 мин. После отгонки активность  $^{103}\text{Ru}$  в ловушке на линии  $E_\gamma = 497$  кэВ не наблюдалась. Интенсивность рентгеновской линии в области энергии 20 кэВ с учетом временных поправок соответствовала равновесной активности  $^{103\text{m}}\text{Rh}$ , близкой к исходной активности  $^{103}\text{Ru}$ , что говорит о высокой эффективности выделения  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  из  $\text{RuO}_4$  при отгонке последнего. После отгонки проводился смыв  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  кипящей царской водкой. Через три часа после окончания процесса фотопик в области энергии 20 кэВ в растворе уже не регистрировался.

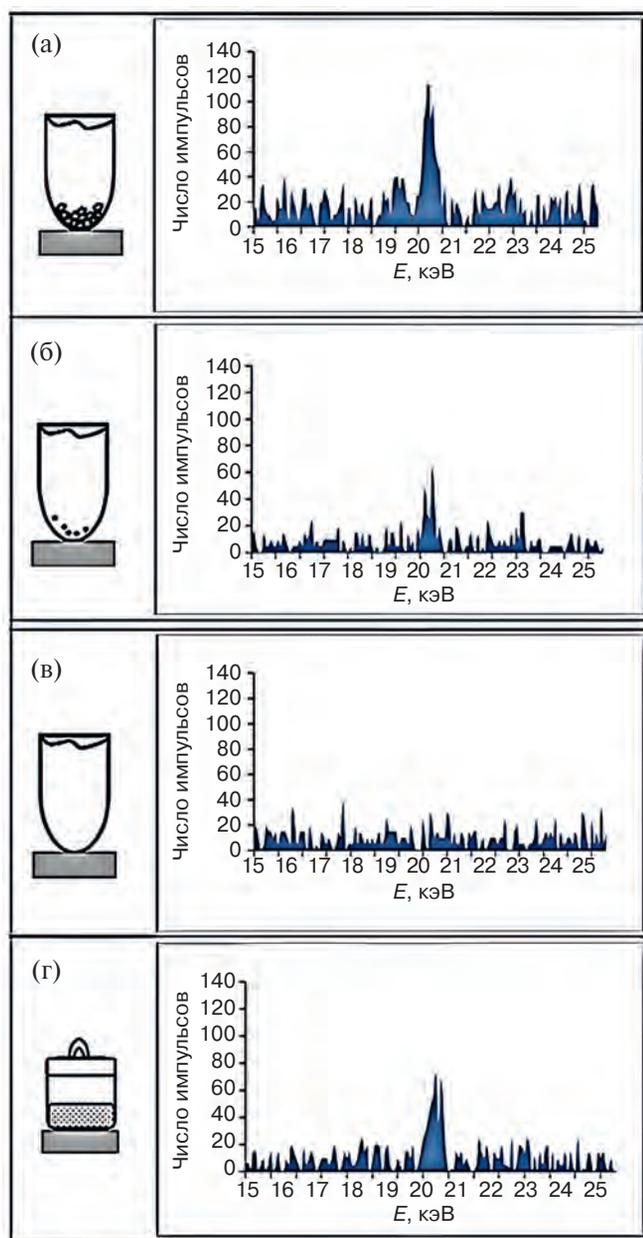
В качестве иллюстрации на рис. 7 приведены аппаратные рентгеновские спектры  $^{103}\text{Ru}$  и  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  при операциях по выделению  $^{103\text{m}}\text{Rh}$ .

Дальнейшее использование выделяемого таким образом  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  предполагает упаривание исходного раствора до влажных солей с последующим растворением в воде или кислотах с регламентированной молярностью.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наличие у Ru газообразной окиси (в отличие от иных элементов платиновой группы) оказалось весьма плодотворным для решения задачи по наработке изотопа  $^{103\text{m}}\text{Rh}$ , рассматриваемого в качестве кандидата для создания радиофармпрепаратов на его основе. Проведенная в работе конверсия металлического Ru в газообразный  $\text{RuO}_4$  позволила получить рутений без примесей в виде  $\text{RuO}_4$  и использовать его для наработки  $^{103\text{m}}\text{Rh}$ , а также выделить нарабатываемый целевой изотоп  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  путем отгонки  $\text{RuO}_4$ .

Использование такого подхода открывает возможность создания генератора  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  на основе многократной перегонки порции  $\text{RuO}_4$  из ловушки в ловушку и наработки  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  путем чередования перегонки и элюирования.



**Рис. 7.** Стадии выделения  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  и соответствующие рентгеновские спектры: **а** – сконденсированные в ампуле кристаллы  $^{103}\text{RuO}_4$ ; **б** – оставшийся в ампуле  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  после полной отгонки  $\text{RuO}_4$  (контроль Ru по линии с энергией 497 кэВ); **в** – ампула после смыва  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  царской водкой; **г** – бюкс со смывом  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  царской водкой объемом 1 мл.

В работе получены следующие основные результаты:

– показана возможность создания  $^{103}\text{Ru}/^{103\text{m}}\text{Rh}$  изотопного генератора, основанного на выделении дочернего  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  путем газификации и отгонки материнского  $\text{RuO}_4$ ;

– разработана методика конверсии металлического  $\text{Ru}$  в  $\text{RuO}_4$  с выходом примерно 84% по металлу;

– разработан способ синтеза  $\text{K}_2\text{RuO}_4$  в растворе с использованием  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$  в качестве окислителя;

– предложено использовать получаемый  $\text{RuO}_4$  для синтеза растворимых рутениевых комплексов с известным зарядом, позволяющих разделять рутений и  $^{103\text{m}}\text{Rh}$  методами ионообменной хроматографии.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке НИЦ “Курчатовский институт”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Skarnemark G., Odegaard-Jensen A., Nilsson J., Bartos B., Kowalska E., Bilewicz A., Bernhardt P.* // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2009. V. 280. P. 371. <https://doi.org/10.1007/s10967-009-0529-1>
2. *Bernhardt P., Forssell-Aronsson E., Jacobsson L., Skarnemark G.* // *Acta Oncol.* 2001. V. 40. P. 602. <https://doi.org/10.1080/028418601750444141>
3. *Filosofov D., Kurakina E., Radchenko V.* // *Nucl. Med. Biol.* 2021. V. 94–95. P. 1. <https://doi.org/10.1016/j.nucmedbio.2020.12.001>
4. *De Frenne D.* // *Nucl. Data Sheets.* 2009. V. 110. P. 2081. <https://doi.org/10.1016/j.nds.2009.08.002>
5. *Никольский А.Б., Рябов А.Н.* // *ЖНХ.* 1965. Т. 10. С. 3.
6. *Никольский А.Б.* // *ЖНХ.* 1963. Т. 8. С. 1045.
7. *Горюнов А.А., Мюллер Р.Л., Капустина Л.К.* // *Вестник ЛГУ. Серия физ. хим.* 1960. Т. 10. Вып. 2. С. 104.
8. *Горюнов А.А., Свешникова Л.А.* // *ЖНХ.* 1960. Т. 6. С. 1543.
9. *Connick R.E., Hurley C.R.* // *J. Am. Chem. Soc.* 1952. V. 74. P. 5012. <https://doi.org/10.1021/ja01140a007>
10. *Брауэр Г., Герцог С., Глемзер О.* *Руководство по неорганическому синтезу.* Т. 5. М.: Мир, 1985.
11. *Башилов А.В.* Дис. ... канд. хим. наук. М.: МГУ, 2001.
12. *Wolsey W.C., Reynolds Ch.A., Kleyenberg J.* // *Inorg. Chem.* 1963. V. 2. P. 463. <https://doi.org/10.1021/ic50007a009>

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БЫСТРЫХ  
НЕЙТРОНОВ С ЛЕГКИМИ ЯДРАМИ СО СПЕКТРОМЕТРОМ ПАР  
ЭЛЕКТРОНОВ И ПОЗИТРОНОВ© 2025 г. С. Х. Караевский<sup>a</sup>, С. И. Поташев<sup>a, b</sup>, Ю. М. Бурмистров<sup>a</sup>, А. А. Каспаров<sup>a, \*</sup>,  
Е. А. Пермяков<sup>a</sup>, В. Н. Пономарев<sup>a</sup>, В. И. Разин<sup>a</sup><sup>a</sup> Институт ядерных исследований Российской академии наук  
Россия, Москва, 117312, просп. 60-летия Октября, 7а<sup>b</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук  
Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53

\* e-mail: kasparov200191@gmail.com

Поступила в редакцию 18.12.2024 г.

После доработки 22.01.2025 г.

Принята к публикации 25.02.2025 г.

Разработана установка для исследования взаимодействия быстрых нейтронов с энергией свыше 1 МэВ с легкими ядрами с вылетом ядра  ${}^3\text{H}$  или  ${}^4\text{He}$  и электрон-позитронной пары. Она включает в себя позиционно-чувствительный детектор нейтронов с размерами  $50 \times 50 \text{ мм}^2$ , состоящий из слоя исследуемого ядра и пропорциональной камеры, два позиционно-чувствительных кремниевых детектора размерами  $64 \times 64 \text{ мм}^2$  и два сцинтилляционных детектора на основе кристаллов NaI диаметром 42 мм и высотой 46 мм с разрешением по энергии электронов около 4.5%. Пространственная реконструкция события и измерение энергии и угла вылета электрона и позитрона позволят исследовать редкие внутриядерные процессы с рождением пар электронов и позитронов внутренней конверсии.

DOI: 10.31857/S0032816225030037

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование внутренней кластерной структуры легких ядер, таких как  ${}^{10}\text{B}$ ,  ${}^{11}\text{B}$ ,  ${}^9\text{Be}$  и  ${}^8\text{Be}$ , а также изучение каналов их распада является в настоящее время актуальной задачей. Ядро  ${}^8\text{Be}$  может образоваться в возбужденном состоянии и распадаться с испусканием не только гамма-кванта, но и электрон-позитронной пары внутренней конверсии. В реакции взаимодействия протона с ядром  ${}^7\text{Li}$  образуется ядро  ${}^8\text{Be}^*$ , которое в редких случаях (с вероятностью 0.0001–0.001 по сравнению с испусканием  $\gamma$ -кванта) может распадаться с испусканием  $e^+e^-$ -пары внутренней конверсии. В распределении таких событий по углу разлета  $e^+$  и  $e^-$ , которое, как ожидалось в рамках стандартной модели, должно быть монотонно убывающей функцией, было обнаружено аномальное увеличение вблизи угла  $140^\circ$ , что может быть связано с рождением новой частицы-бозона с  $J^P = 1^+$  с массой примерно

16.7 МэВ [1]. Это можно проверить, если доказать существование или установить верхний предел на существование этой частицы в другой реакции,  $n + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^3\text{H} + {}^8\text{Be}^*$ , при энергии около 18 МэВ, идентифицируя вылет ядра  ${}^3\text{H}$  с образованием промежуточного ядра  ${}^8\text{Be}^*$ .

В исследованиях  $E_0$ -переходов в ядрах использовался спектрометр пар электронов и позитронов на основе пластмассовых сцинтилляторов [2]. В данной работе применялась комбинация тонких (0.5 мм) и толстых (от 2 до 5 см) пластмассовых сцинтилляторов NE 102A для идентификации электронов и позитронов. Однако энергетическое разрешение составляло около 12%, а угловое разрешение было невысоким, поскольку определялось размерами сцинтилляторов, от 2 до 4 см.

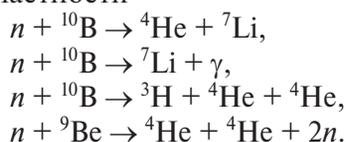
Для поиска экзотических бозонов, распадающихся на электрон и позитрон, использовалась установка с дрейфовыми камерами и пластмассовыми сцинтилляторами для запуска триггера событий [3].

Для одновременного измерения энергии и углового распределения электронов и позитронов для исследования мультипольных ядерных переходов создана установка из шести пластмассовых  $\Delta E$ - $E$ -телескопов [4].

В нашей работе представлены результаты создания на нейтронном канале РАДЭКС ИЯИ РАН установки для исследования взаимодействия быстрых нейтронов с энергией более 1 МэВ с легкими ядрами с регистрацией электрон-позитронной пары и ядра  ${}^3\text{H}$  или  ${}^4\text{He}$  для идентификации исследуемой реакции. Эта установка включает в себя не только детектор электронов и позитронов с позиционным разрешением не менее 2 мм, но и позиционно-чувствительный детектор нейтронов и вторичных ядер [5], что расширяет функциональные возможности установки.

## 2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

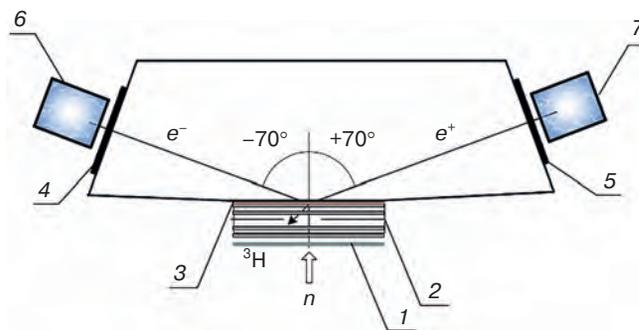
Установка, схема которой представлена на рис. 1, состоит из позиционно-чувствительного детектора нейтронов (ПЧДН) на основе слоя с исследуемым ядром и пропорциональной камеры, двух позиционно-чувствительных кремниевых детекторов (ПЧКД) и двух сцинтилляционных детекторов (СД) на основе кристаллов NaI. Установка предназначена для исследования взаимодействия быстрых нейтронов с энергией более 1 МэВ с легкими ядрами для идентификации исследуемых реакций, в частности



Пространственная реконструкция зарегистрированных событий позволит исследовать внутриядерные переходы и редкие внутриядерные процессы с возможным рождением пар электронов и позитронов внутренней конверсии.

Эксперименты по исследованию кластерной структуры легких ядер будут выполняться на канале быстрых нейтронов РАДЭКС линейного ускорителя протонов ИЯИ РАН. Максимальная энергия нейтронов определяется энергией первичного протонного пучка.

Нейтроны будут регистрироваться с помощью ПЧДН, который является одновременно твердотельной мишенью и детектором вторичных ядер с измерением их ионизационных



**Рис. 1.** Схема установки для исследования взаимодействия быстрых нейтронов с легкими ядрами: 1 – фильтр из кадмия, 2 – ПЧДН, 3 – слой-мишень, 4 и 5 – ПЧКД, 6 и 7 – сцинтилляционные детекторы NaI.

потерь и угла вылета. Мишень является сменной, в настоящее время изготовлены мишени из  ${}^{10}\text{B}$  толщиной 3 мкм и  ${}^9\text{Be}$  толщиной 1 мкм.

Точка ядерного взаимодействия также определяется с помощью ПЧДН. Угол вылета электрона или позитрона определяется позицией этой точки и позицией, зарегистрированной соответствующим ПЧКД толщиной 0.35 мм. Энергия электрона или позитрона измеряется с помощью сцинтилляционного детектора на основе кристалла NaI диаметром 42 мм и высотой 46 мм, просматриваемого фотоумножителем ФЭУ-143. Угол вылета электрона или позитрона с энергией от 4 до 12 МэВ измеряется с помощью ПЧКД релятивистских частиц, обладающих минимальной ионизацией.

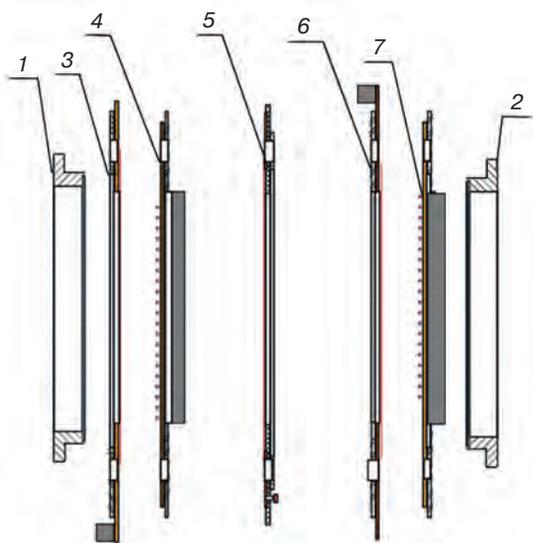
Ожидаемые параметры отдельных частей установки приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Параметры отдельных частей установки

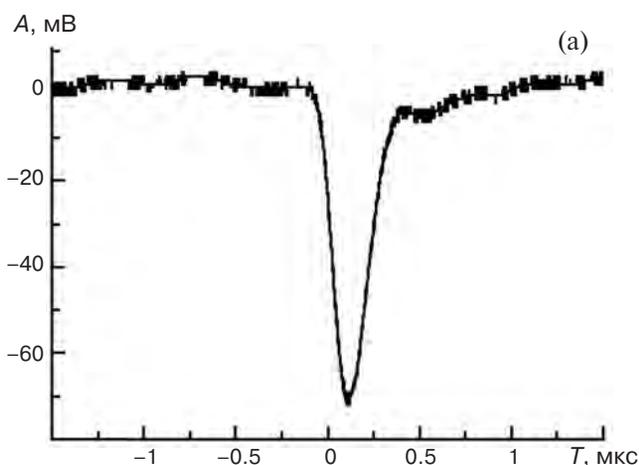
Параметр	Значение
Загрузочная способность ПЧДН нейтронами с энергией более 1 МэВ	$10^9 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$
Чувствительная площадь ПЧДН	$5 \times 5 \text{ см}^2$
Позиционное разрешение ПЧДН	0.2 см
Число электронных каналов ПЧДН	$4 \times 8 = 32$
Чувствительная площадь ПЧКД	$6.4 \times 6.4 \text{ см}^2$
Число электронных каналов ПЧКД	32
Чувствительные размеры СД: диаметр и высота	4.2 и 4.6 см
Телесный угол каждого плеча при расстоянии 20 см от мишени	0.1 ср
Угловое разрешение при расстоянии 20 см от мишени	10 мрад

### 3. ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ДЕТЕКТОР НЕЙТРОНОВ

Новый двухкоординатный позиционно-чувствительный детектор нейтронов размерами  $50 \times 50 \text{ мм}^2$  [5], схематично представленный на рис. 2, состоит из двух слоев исследуемого ядра ( $^{10}\text{B}$  или  $^9\text{Be}$ ), каждый из которых имеет толщину от 1 до 3 мкм, и проволочной камеры (шаг проволочек составляет 2 мм) с четырьмя чувствительными газовыми промежутками для измерения частичных и полных потерь вылетающего из



**Рис. 2.** Двухкоординатный позиционно-чувствительный детектор нейтронов размерами  $50 \times 50 \text{ мм}$ : 1 – передняя кремниевая пластина со слоем ядра-мишени, 2 – задняя кремниевая пластина со слоем ядра-мишени, 3 – проволочный катод  $X_1$ , 4 – проволочная сетка  $Y_1$ , 5 – проволочный анод, 6 – проволочная сетка  $X_2$ , 7 – проволочный катод  $X_2$ .



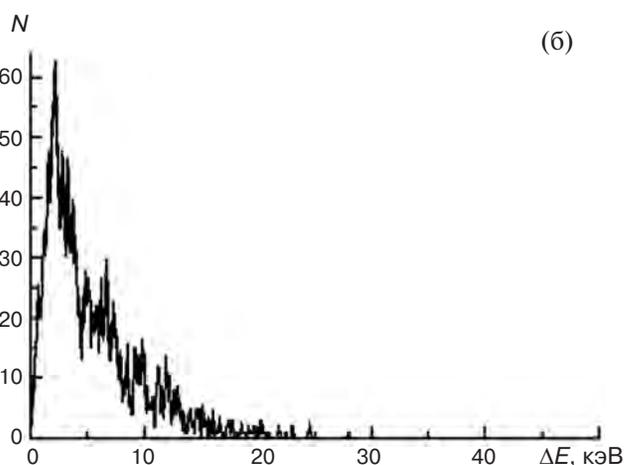
реакции ядра, а также координаты точки взаимодействия.

Применение второго слоя изотопа  $^{10}\text{B}$  позволяет вдвое увеличить эффективность установки. Такая конструкция детектора позволяет определить энергию, угол вылета и тип ядра, а также энергию нейтрона. Кроме того, по величинам ионизационных потерь в четырех последовательных чувствительных газовых промежутках можно идентифицировать вылетающее ядро и, соответственно, канал реакции, в котором оно образовалось [6, 7].

### 4. ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ КРЕМНИЕВЫЙ ДЕТЕКТОР ЭЛЕКТРОНОВ

Однокоординатный позиционно-чувствительный детектор электронов размерами  $64 \times 64 \text{ мм}^2$ , толщиной 0.35 мм с шагом чувствительных элементов 2 мм совместно с ПЧДН будет применяться для определения угла вылета электрона или позитрона. Он состоит из собственно кремниевого детектора, 32-канального предварительного усилителя и 32-канального повторителя для сопряжения с модулем оцифровки с получением 32 осциллограмм.

Осциллограмма сигнала с одного из выходов данного детектора от радиоактивного источника  $^{90}\text{Sr}$  ( $^{90}\text{Y}$ ) представлена на рис. 3а, а спектр ионизационных потерь электронов – на рис. 3б. Запуск оцифровки будет осуществляться под управлением сигнала от ПЧДН. Появление сигнала в кремниевом детекторе указывает на регистрацию заряженной частицы (электрона или позитрона), а отсутствие сигнала в нем при наличии сигнала в сцинтилляционном детек-



**Рис. 3.** Результаты измерений с помощью однокоординатного кремниевого позиционно-чувствительного детектора электронов размерами  $64 \times 64 \text{ мм}^2$ : а – осциллограмма сигнала от электрона одного из выходов детектора; б – спектр ионизационных потерь электронов из источника  $^{90}\text{Sr}$  ( $^{90}\text{Y}$ ) одного из выходов детектора.

торе указывает на регистрацию  $\gamma$ -кванта. Таким образом, по совпадению обоих сигналов от электрона и позитрона можно идентифицировать редкие события с образованием пары  $e^+$  и  $e^-$  в данной ядерной реакции.

## 5. СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ДЕТЕКТОР ЭЛЕКТРОНОВ

Для определения энергии электрона и позитрона используют два сцинтилляционных детектора на основе NaI толщиной 46 мм и диаметром 42 мм. Они чувствительны к  $\gamma$ -квантам. Факт регистрации электрона (позитрона) можно установить по совпадению сигналов от ПЧКД и NaI-детектора. Факт регистрации пары устанавливается по совпадению сигналов от двух ПЧКД и двух NaI-детекторов. Факт регистрации  $\gamma$ -кванта устанавливается по отсутствию сигнала от ПЧКД и наличию сигнала от NaI-детектора. Ожидаемое разрешение NaI-детектора – около 3–4% при энергии 8 МэВ. Сигнал триггера от регистрации нейтрона в ПЧДН запускает сбор данных установки.

## 6. СПЕКТР ОТ РАДИОАКТИВНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОНОВ

Для выбора режима работы сцинтилляционного детектора выполнялось измерение энергетического спектра электронов от радиоактивного источника  $^{90}\text{Sr}$  ( $^{90}\text{Y}$ ). Спектры при напряжении 1600 и 1700 В представлены на рис. 4а и рис. 4б соответственно. При напря-

жении 1600 В наблюдается характерный спектр энергий электронов, ограниченный нижним порогом регистрации около 0.75 МэВ с положением максимума около 1 МэВ. При напряжении 1700 В резко нарастает собственный шум фотомножителя. Это приводит к тому, что электрический пробой в детекторе вызывает паразитные сигналы большой амплитуды, отражающиеся в спектре как длинный хвост на рис. 4а. При напряжении ниже 1600 В наблюдается значительное падение амплитуды сигнала и, как следствие, эффективности детектора. Таким образом, напряжение 1600 В является оптимальным.

## 7. СПЕКТР КОСМИЧЕСКОГО ФОНА И РАЗРЕШЕНИЕ ПО ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ

Спектр ионизационных потерь космического фона измеряли с помощью сцинтилляционного детектора NaI при напряжении 1700 В (рис. 5а) и 1600 В (рис. 5б). Сравнивая два этих спектра, находим, что и здесь присутствует увеличенный шум детектора, связанный с большими амплитудами в спектре от электрического пробоя. Калибровка спектра на рис. 5б основана на сравнении вычисленных ионизационных потерь релятивистских частиц (мюонов) и положения ярко выраженного пика в конце спектра космических частиц.

Высота детектора составляет  $H = 4.2$  см, плотность NaI  $\rho = 3.67 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ , удельные ионизационные потери релятивистских частиц с мини-

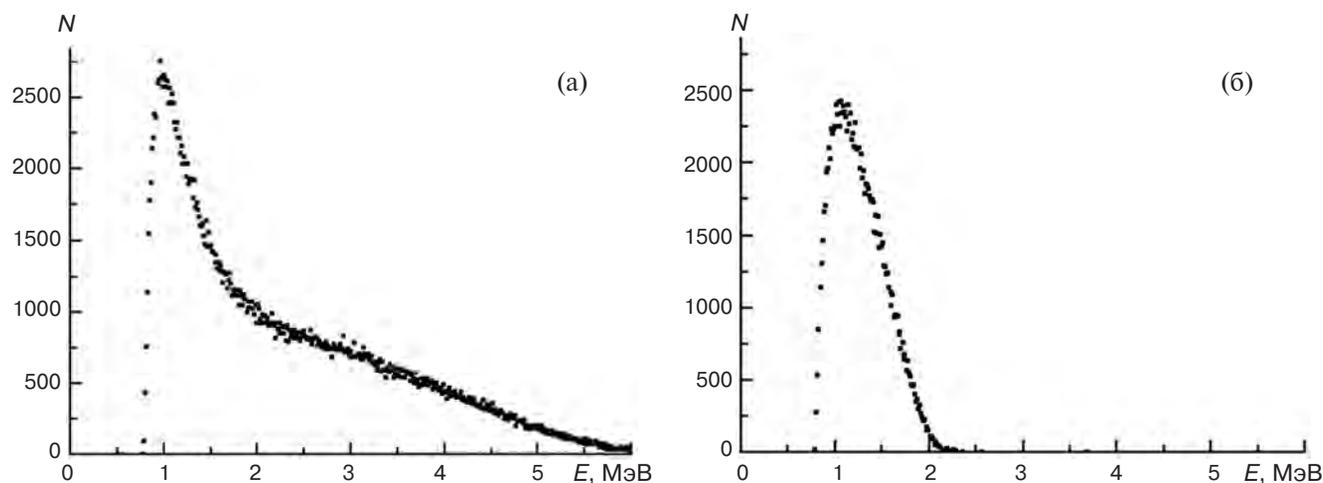


Рис. 4. Результаты измерений с помощью детектора NaI. Спектры электронов из источника  $^{90}\text{Sr}$  ( $^{90}\text{Y}$ ) при следующих напряжениях: а – 1700 В, б – 1600 В.

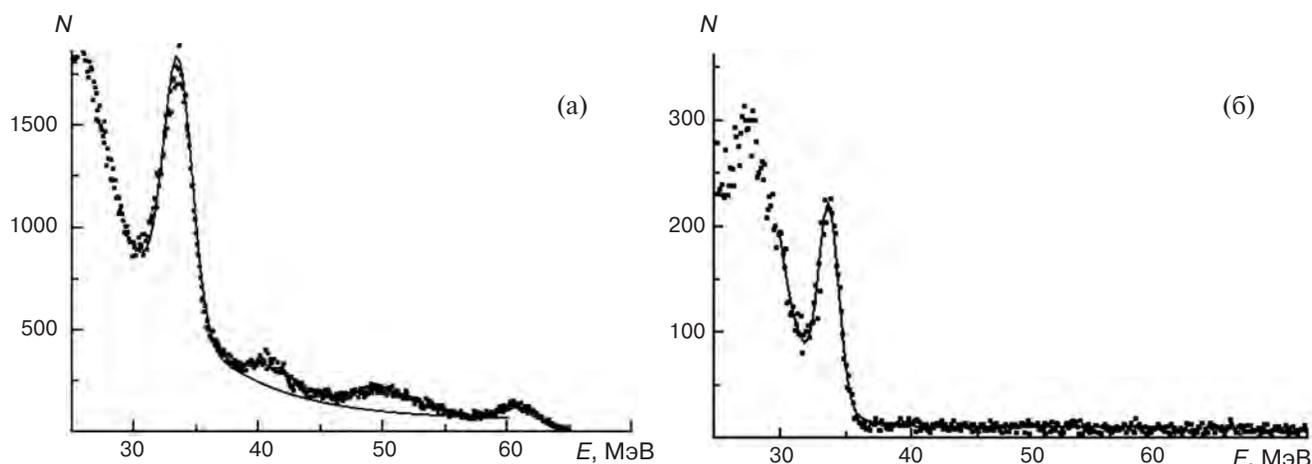


Рис. 5. Результаты измерений с помощью детектора NaI. Спектры космического фона с аппроксимацией убывающей экспонентой и гауссианом для пика космических релятивистских мюонов с минимальной ионизацией при следующих напряжениях: а – 1700 В, б – 1600 В.

мальной ионизацией  $dE/dx = 2 \text{ МэВ} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{см}^2$ . Средние ионизационные потери составляют

$$\Delta E = \rho \frac{dE}{dx} H. \quad (1)$$

Аппроксимация фона экспоненциальным спадом и аппроксимация мюонного пика гауссианом при ионизационных потерях релятивистских мюонов около 33 МэВ, вычисленных по формуле (1), дают разрешение по энергии для релятивистских частиц с минимальной ионизирующей способностью не хуже 6.3% при напряжении 1700 В и 4.5% при напряжении 1600 В. При напряжении питания 1550 В измеренное разрешение по энергии было также не хуже 4.5%, но наблюдалось падение эффективности детектора до 85% по сравнению с эффективностью при напряжении 1600 В. Таким образом, выбирается рабочее напряжение 1600 В.

## 8. ВЫВОДЫ

На нейтронном канале РАДЭКС ИЯИ РАН создана установка для изучения реакций взаимодействия быстрых нейтронов с легкими ядрами и с рождением пар  $e^+$  и  $e^-$  внутренней конверсии. Установка включает в себя позиционно-чувствительный детектор нейтронов и одновременно мишень, а также спектрометр пар электронов и позитронов. Получена экспериментальная оценка энергетического разрешения при регистрации электронов не хуже 4.5% при ионизационных потерях релятивистских мюонов около 33 МэВ. Оптимальное напряжение питания для сцинтилляционного детектора

составило 1600 В. Данная установка позволяет исследовать редкие внутриядерные процессы с рождением пар электронов и позитронов внутренней конверсии, кластерную структуру легких ядер, а также провести поиск экзотических бозонов, находящихся вне стандартной модели элементарных частиц.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Выражаем огромную благодарность старшему научному сотруднику ИЯИ РАН А.П. Ивашкину за помощь и поддержку данной работы.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 6 “Ядерная и радиационная физика”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Krasznahorkay A.J., Csatos M., Csige L. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 116. P. 042501. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.042501>
2. *Stiebing K.E., de Boer F.W.N., Frohlich O. et al.* // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2004. V. 30. P. 165. <https://doi.org/10.1088/0954-3899/30/2/014>
3. *Blomqvist K.I., Boeglin W.U., Bohm R. et al.* // Nucl. Instr. and Meth. A. 1998. V. 403. P. 263. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(97\)01133-9](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(97)01133-9)
4. *Gulyas J., Ketel T.J., Krasznahorkay A.J. et al.* // Nucl. Instr. and Meth. A. 2016. V. 808. P. 21. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.11.009>

5. *Поташев С.И., Афонин А.А., Бурмистров Ю.М., Драчев А.И., Каспаров А.А., Караевский С.Х., Мешков И.В., Пономарев В.Н.* // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2024. № 8. С. 36.  
<https://doi.org/10.31857/S1028096024080058>
6. *Поташев С.И., Каспаров А.А., Пономарев В.Н.* // Известия РАН. Серия физическая. 2022. Т. 86. № 9. С. 1304.  
<https://doi.org/10.31857/S0367676522090241>
7. *Potashov S.I.* // Phys. Atom. Nucl. 2023. V. 86. P. 850.  
<https://doi.org/10.1134/S1063778823050344>

УДК 681.5+004.75

## СПОСОБ ИНТЕГРАЛЬНОГО СЧЕТА ЧАСТИЦ В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ ПУЧКА ОДНОРОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2025 г. Д. Д. Богаченко<sup>а,\*</sup>, В. И. Силаев<sup>а</sup>

<sup>а</sup> *Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова  
национального исследовательского центра “Курчатовский институт”  
Россия, 117218, Москва, ул. Большая Черемушkinsкая, 25*

\* e-mail: *tyrochta-78@mail.ru*

Поступила в редакцию 12.12.2024 г.

После доработки 17.02.2025 г.

Принята к публикации 31.03.2025 г.

Рассмотрен способ интегрального счета числа частиц в поперечном сечении пучка однородного излучения, основанный на измерении числа треков частиц, зарегистрированных в плоскости твердотельного детектора с использованием технологии машинного зрения.

DOI: 10.31857/S0032816225030045

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Разработка интегрального счета частиц по технологии машинного зрения [1] проводилась в ИТЭФ на автоматизированном измерительном координатном микроскопе установки МАС-1, подробно описанной в работе [2].

Согласно технологиям машинного зрения, обрабатываются не сами измеряемые объекты (в частности, треки на зарегистрировавшем их твердотельном детекторе), а их оптические изображения (рис. 1), проецируемые оптическим объективом микроскопа на плоскость ПЗС-матрицы [3], являющейся оптико-электронным преобразователем, изготовленным на основе прибора с зарядовой связью (ПЗС). ПЗС-матрица представляет собой двумерный массив светочувствительных полупроводниковых ячеек (пикселей) размером от 5 до 400 мкм, отделенный слоем диэлектрика от подложки из поликристаллического кремния. К ячейкам с помощью электродов приложено напряжение от внешнего источника, формирующее электрическое поле ПЗС-матрицы (рис. 2).

В диагностике пучков частиц ПЗС-матрица как светочувствительный элемент телевизионной ПЗС-камеры используется для получения двумерного изображения распределения плот-

ности пучка излучения в его поперечном сечении [3].

В настоящее время технологии машинного зрения используются более широко, в частности, для обработки изображений треков частиц,



Рис. 1. Фрагмент координатной сетки, нанесенной на плоскость облученного слюдяного детектора, предназначенной для поштучного визуального подсчета следов частиц в поле зрения оптического микроскопа.

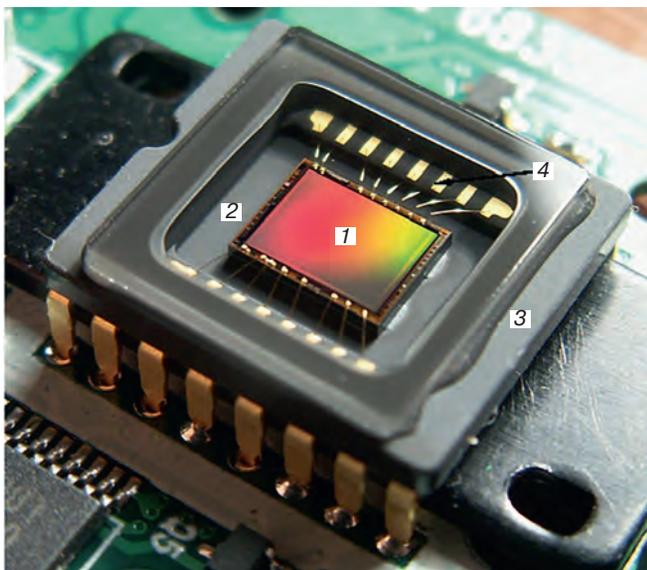


Рис. 2. Структура ПЗС-матрицы: 1 – двумерный массив светочувствительных полупроводниковых ячеек, 2 – слой диэлектрика, 3 – подложка из поликристаллического кремния, 4 – электроды.

зарегистрированных в твердотельных детекторах в экспериментах в области физики элементарных частиц [4, 5]. Автоматические и полуавтоматические измерительные установки содержат при этом функционально схожие основные узлы, такие как оптико-электронная система, укомплектованная телевизионной камерой со светочувствительным элементом из ПЗС-матрицы, компьютером с контроллером, предназначенным для оцифровки изображений с ПЗС-матрицы телевизионной камеры [4–6] и вывода оцифрованных изображений в ЭВМ.

Наличие таких узлов на автоматических или полуавтоматических установках позволяет с высокой скоростью решать задачи получения количественных и качественных результатов измерений путем поштучного поиска и обмера больших массивов треков частиц в неоднородных пучках [5, 6].

Для измерений, связанных с определением количества частиц в поперечном сечении пучка однородного излучения, зарегистрированных в плоскости твердотельного детектора, предлагается интегральный способ счета частиц, в основе реализации которого лежит использование технологии машинного зрения.

## 2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Изображения треков частиц в кадре ПЗС-камеры могут быть двух различных видов: сером, базовом, изображении, пиксели ПЗС-матрицы

которого имеют различные уровни почернения в интервале от 0 до 255 единиц, соответствующем 256 уровням почернений, заложенным в контроллере, и пороговом изображении, в котором пиксели изображения кадра имеют один из двух уровней почернения с численным значением равным либо нулю, либо численному значению уровня, называемому порогом, значение которого определяется специальной процедурой, описанной ниже.

Виды оцифровки изображения закладываются в контроллер разработчиком ООО “ВИДЕОСКАН” и определяются одним из типов прошивки, которые поставляются пользователю вместе с описанием контроллера.

Оцифровываемый в контроллере сигнал, как в сером (рис. 3), так и в пороговом (рис. 4) изображениях, передается параллельно на видеопросмотровое устройство (монитор), а его оцифрованные данные заносятся в память компьютера.

Изображение части плоскости детектора, проектируемое оптическим объективом микроскопа на светочувствительную поверхность ПЗС-матрицы, занимает прямоугольную область  $[\Delta X \times \Delta Y]$ , содержащую фиксированное количество пикселей, например  $512 \times 512$  или  $1024 \times 1024$  шт. и др., образующих область кадра ПЗС-камеры. При сканировании плоскости детектора рамки кадра перемещаются по осям  $X$  и  $Y$  прямоугольной системы координат микроскопа на расстояния  $\Delta X$  или  $\Delta Y$ , равные размерам рамки кадра, с точностью до  $\pm 1$  мкм, обеспечиваемой безынерционными приводами и отсчетными устройствами линейных перемещений кареток  $X$  и  $Y$  полуавтоматического микроскопа МАС-1, разработанного в ИТЭФ [2]. При этом не требуется никаких дополнительных разметок ни на детекторе, ни на его изображении, так как расстояния, пройденные рамками кадра относительно плоскости детектора, при каждом перемещении на один очередной кадр отсчитываются ЭВМ и выводятся с точностью  $\pm 1$  мкм на экран отдельного монитора для контроля оператором.

Интегральный способ счета количества следов частиц в кадре ПЗС-камеры осуществляется в пороговом исполнении изображений следов частиц, который проводится в ИТЭФ на автоматизированном измерительном микроскопе установки МАС-1 (ИТЭФ), оснащенной телевизионной ПЗС-камерой SONY ССВ-М27В/СЕ производства ООО “ВИДЕОСКАН”

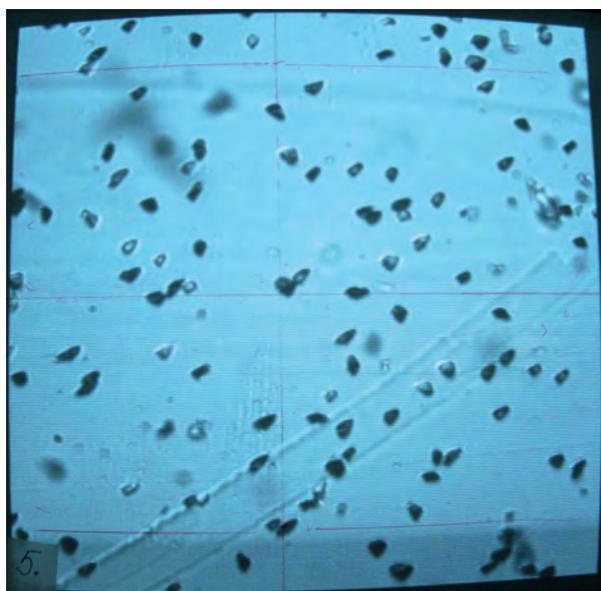


Рис. 3. Кадр на видеомониторе в сером изображении треков частиц с ненулевым значением фона.



Рис. 4. Тот же кадр на видеомониторе, что и на рис. 3, но его средняя часть показана уже в пороговом черно-белом изображении треков частиц с нулевым значением фона.

со светочувствительным элементом ПЗС-матрицы с количеством пикселей  $512 \times 512$  (рис. 2), компьютером типа IBM PC/AT с видеоплатой и контроллером типа VS54/2.

### 3. ПОРОГОВОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ

Для интегрального счета количества треков частиц в поперечном сечении пучка однородного излучения, зарегистрированных в плоскости твердотельного детектора, избирается технология машинного зрения, в соответствии с которой проводимые для этого измерения осуществляются не в плоскости детектора, а в плоскости его изображения, проецируемого оптической системой микроскопа на плоскость ПЗС-матрицы пикселей телевизионной ПЗС-камеры. Аналоговый сигнал серого изображения кадра ПЗС-камеры поступает для визуального контроля на видеопросмотровое устройство оператора и параллельно на контроллер в компьютере для оцифровки уровней почернений пикселей в кадре ПЗС-камеры и переходу к пороговому изображению по следующему алгоритму.

Для перехода от серого заложенного в ПЗС-камеру изображения частиц в кадре ПЗС-камеры к их пороговому изображению определяется уровень почернения порога. С этой целью в некоторой области измерения серое изображение треков частиц в кадре размывается до состояния, слива-

ющегося с вновь образующимся фоном, заполняющим полностью кадр ПЗС-камеры, и передается напрямую в ЭВМ, где уровень почернения размытого изображения кадра оцифровывается в контроллере целым числом из интервала от 0 до 255 единиц, что принимается за численное значение порога, обозначается символом  $P$  и заносится в файл. Далее это размытое изображение треков частиц в кадре восстанавливается, и на него накладывается порог.

При наложении порога на восстановленное серое изображение кадра ПЗС-камеры (рис. 3), уровни почернения пикселей кадра ПЗС-матрицы, которые оказались меньше значения уровня почернения порога, оцифровываются численным значением равным нулю. Уровни почернения пикселей ПЗС-матрицы, которые оказались равными или большими значения уровня почернения порога  $P$ , оцифровываются числом  $P$ . Полученное изображение черных треков частиц на очищенном от помех однородном светлом фоне называется пороговым изображением (рис. 4), а описанную процедуру называют фильтрацией изображения кадра ПЗС-камеры.

В пороговом изображении треков частиц измеряемая величина (количество  $M$  черного в кадре ПЗС-камеры) оцифровывается суммой численных значений  $P$ , определяемой числом пикселей, изображающих полное количество треков в кадре ПЗС-камеры, и выражается формулой

$$M = Pn, \quad (1)$$

где  $M$  – численное значение количества черного в кадре;  $P$  – уровень почернения каждого пикселя, численно равный уровню почернения порога;  $n$  – число пикселей в пороговом изображении треков частиц в кадре ПЗС-камеры.

Из выражения (1) следует, что пороговое изображение позволяет установить взаимно однозначное соответствие между количеством черного в кадре и числом пикселей, образующих изображения треков в кадре.

Переходя от измерений в единицах  $M$  к измерениям в единицах  $n$ , при смене кадров можно записать:

$$n = M/P. \quad (2)$$

Здесь  $M$  – величина переменная,  $P$  – величина неизменная, численно равная значению порога.

Рассмотрим ситуацию, когда изображение каждого трека частицы в плоскости кадра ПЗС-камеры содержит одно и то же число пикселей, образующих изображения треков в кадре. На практике подобная ситуация будет иметь место в тех случаях, когда траектории частиц пучка однородного излучения будут пересекать плоскость регистрации твердотельного детектора под одним и тем же углом.

В этом случае число изображений треков в кадре ПЗС-камеры может быть выражено следующей формулой:

$$K = n/\varepsilon, \quad (3)$$

где  $n$  – число пикселей, образующих количество изображений треков частиц в кадре, определяемое равенством (2),  $\varepsilon$  – число пикселей в изображении одного трека частицы в кадре ПЗС-камеры – величина одна и та же для каждого трека (численно неизвестная),  $K$  – число изображений треков частиц в кадре ПЗС-камеры.

Задача сводится к определению численного значения  $\varepsilon$ , единого для изображения каждого следа частицы облучения в каждом кадре ПЗС-камеры.

Преобразовав выражение (3) к виду

$$\varepsilon = n/K, \quad (4)$$

получим выражение, отражающее обратно пропорциональную зависимость величины  $\varepsilon$  от количества  $K$  треков в кадре ПЗС-камеры, которое может быть установлено независимым прямым визуально-ручным счетом.

Определение единого численного значения  $\varepsilon$  проиллюстрируем нашими измерениями на установке МАС-1 (ИТЭФ).

Для нахождения единого численного значения величины  $\varepsilon$  выделялась короткая серия кадров изображений ПЗС-камеры, разбросанных в нескольких (в нашем случае в семи) различных точках  $(x_i, y_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, 7$  области измерений, где  $i$  – порядковый номер кадра в короткой серии кадров.

В каждом кадре короткой серии кадров, проектируемом на экран монитора, визуально-ручным способом метится каждый след частицы и проводится поштучный подсчет числа  $k_i$  следов частиц в кадре. По значениям  $n_i = M_i/P$  и  $k_i$  для каждого из семи кадров расчетным путем определялась величина

$$\varepsilon_i = n_i/k_i,$$

где  $\varepsilon_i$  – число пикселей в изображении одного трека в  $i$ -м кадре короткой серии кадров.

Оцифрованные значения  $M_i, k_i, n_i, \varepsilon_i$  которые отражены в табл. 1, записывались в виде файла на компьютер.

Для определения единого численного значения  $\varepsilon_0$ , с помощью которого будет рассчитываться число  $K$  следов частиц в каждом кадре, при сканировании плоскости детектора для каждого из семи кадров было рассчитано число следов с каждым из семи значений  $\varepsilon_i$ , что отражено в табл. 1.

Среди семи расчетных значений  $\varepsilon_i$  были отобраны четыре, при которых расчетные значения  $K_i$  и одноименные с ними значения  $k_i$  поштучного счета удовлетворяли условию  $|K_i - k_i| \leq 0.5$  для наибольшего количества номеров  $i$ . Такими оказались значения  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_5$  и  $\varepsilon_7$  в кадрах с соответствующими номерами. Было рассчитано среднее значение  $\bar{\varepsilon}$  по формуле

$$\bar{\varepsilon} = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_5 + \varepsilon_7)/4 = 1.535.$$

Полученное значение было использовано для определения числа  $K_i$  следов частиц в каждом кадре короткой серии в соответствии с выражением

$$K_i = n_i/\bar{\varepsilon}.$$

Полученные значения отражены в табл. 2.

Видно, что в четырех кадрах из семи расчетные значения  $K_i$ , округленные до целых чисел, совпадают со значениями  $k_i$  в тех же кадрах при поштучном счете. Несовпадение  $K$  на один след с количеством следов  $k$  при поштучном счете в каждом из оставшихся трех кадрах составляет ошибку, не превышающую 1.5% (см. табл. 2).

На основании полученных результатов численное значение  $\bar{\varepsilon} = 1.535$  принимается за единое

**Таблица 1.** Результаты измерений оцифрованных значений  $M_i$ ,  $k_i$ ,  $n_i$ ,  $\varepsilon_i$  на установке МАС-1 (ИТЭФ) при  $P = 100$ ,  $\varepsilon_0 = 1.535$

$i$	1	2	3	4	5	6	7
$M_i$	15461	13962	14585	12548	14274	11718	9252
$n_i$	154.61	139.62	145.85	125.48	142.74	117.18	92.52
$k_i$	101	91	94	83	93	75	60
$\varepsilon_i$	1.5301	1.5343	1.5515	1.5118	1.5348	1.5685	1.542
$K_i(\varepsilon_1)$	101	91.2	95.28	81.97	93.27	76.85	60.44
$K_i(\varepsilon_2)$	100.77	91	95.06	81.78	93.03	76.67	60.3
$K_i(\varepsilon_3)$	99.6	89.98	94.00	80.87	91.99	75.80	59.63
$K_i(\varepsilon_4)$	102.27	92.35	96.47	83.00	94.42	77.81	61.20
$K_i(\varepsilon_5)$	100.73	90.97	95.03	81.76	93.00	76.69	60.28
$K_i(\varepsilon_6)$	98.68	89.01	93.62	80.00	91.00	75.00	58.99
$K_i(\varepsilon_7)$	100.27	90.54	94.58	81.37	92.57	76.29	60
$n_i/\bar{\varepsilon}$	100.46	90.72	94.77	81.5	92.75	76.44	60.11

**Таблица 2.** Определение числа следов в кадре со средним значением  $\varepsilon_0$  независимо от номера кадра

$i$	1	2	3	4	5	6	7
$n_i$	154.61	139.62	145.85	125.48	142.74	117.18	92.52
$k_i$	101	91	94	83	93	75	60
$\bar{\varepsilon}$	1.535	1.535	1.535	1.535	1.535	1.535	1.535
$K_i = n_i/\bar{\varepsilon}$	100.73	90.96	95.02	81.75	92.99	76.34	60.27
$K_i$	101	91	95	82	93	76	60
$\Delta K_i =  K_i - k_i $	0	0	1	1	0	1	0
$\Delta K_i / K_i, \%$	0	0	1.06	1.20	0	1.33	0

расчетное и обозначается символом  $\varepsilon_0$ . Выражение для определения числа изображений треков частиц в кадре ПЗС-камеры при сканировании области измерений имеет следующий вид:

$$K = n/\varepsilon_0, \quad (5)$$

где  $K$  – расчетное значение количества изображений треков частиц в кадре телевизионной ПЗС-камеры,  $n$  – численное значение количества черных пикселей в пороговом изображении треков частиц в кадре,  $\varepsilon_0 = 1.535$  – расчетное значение количества пикселей в изображении одного трека, общее для каждого следа в любом из кадров сканирования.

Исходной измеряемой физической величиной при сканировании зоны измерений является измерение количества  $M_i$  черного в пороговом изображении очередного кадра ПЗС-камеры с его оцифровкой и занесением в файл для последующей обработки.

Прежде чем приступить к поточному сканированию намеченной области измерений, следует определить постоянные:  $P$  – порога с его численным значением и  $\varepsilon_0$  – числа пикселей, приходящихся на изображение одного следа частицы в кадре ПЗС-камеры.

После определения и оцифровки этих величин по команде оператора измеряются количества  $M_i$  черного в пороговых изображениях треков частиц в кадрах ПЗС-камеры при поточном сканировании области измерений с занесением значений  $M_i$  в файл для дальнейших вычислений численных значений величин  $n_i$  и  $K_i$ , где  $i$  – номер кадра.

Величины  $n_i$  и  $K_i$  описываются следующими выражениями:

$$n_i = M_i/P, \quad (6)$$

где  $M_i$  – величина переменная,  $P$  – величина постоянная;

**Таблица 3.** Сравнение измерений количества следов частиц способами поштучного и интегрального счета частиц

$i$	1	2	3	4	5	6	7
$k_i$ , шт.	101	91	94	83	93	75	60
$K_i = f(M_i)$	100.723	90.958	95.016	81.745	92.990	76.338	60.247
$K_i$ , шт.	101	91	95	82	93	76	60

*Примечание:*  $k_i$  – число следов частиц в кадре, посчитанных поштучно,  $K_i = f(M_i)$  – число следов частиц в кадре, посчитанных интегральным способом,  $M_i$  – количество черного в кадре,  $i$  – номер кадра. Ошибка при поштучном счете на один трек при количестве треков в кадре в несколько десятков штук вполне допустима.

$$K_i = n_i / \epsilon_0, \quad (7)$$

где  $n_i$  – величина переменная,  $\epsilon_0$  – величина постоянная.

Сделав подстановку выражения (6) в выражение (7), получим равенство вида

$$K_i = (P\epsilon_0)^{-1} M_i, \quad (8)$$

где  $P\epsilon_0$  – величина постоянная при неизменных условиях измерений.

Из выражения (8) следует, что если предварительно перед измерениями вычислить постоянные значения порога  $P$  и количества пикселей  $\epsilon_0$  в изображении одного трека в кадре ПЗС-камеры, то определение числа треков в кадре сведется к единственному измерению количества черного в пороговом изображении треков в кадре, оцифрованного в контроллере числом  $M_i$ , которое по команде оператора, будучи умноженным на коэффициент  $(P\epsilon_0)^{-1}$ , будет занесено в память компьютера как число треков в кадре с номером  $i$ .

Таким образом, выражение (8) является формулой интегрального счета частиц в поперечном сечении пучка однородного излучения, траектории которых пересекают плоскость твердотельного детектора, совмещенную с поперечным сечением пучка однородного излучения под одним и тем же углом.

Вывод формулы (8) основывается на технологии машинного зрения в области регистрации и анализа цифровых изображений [1].

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложен способ интегрального счета треков частиц, основанный на технологии машинного зрения, в котором число следов частиц измеряется не на зарегистрировавшем их плоском твердотельном детекторе, а на его оптическом изображении, проектируемом на светочувствительную ПЗС-матрицу телевизионной ПЗС-камеры.

Предложенный способ интегрального счета изображений треков частиц позволяет получать распределения плотности излучения по поперечному сечению пучка однородных частиц с высокой достоверностью, составляющей (98–100)% (см. табл. 2), что может быть использовано для высокоточного радиобиологического контроля пучков [7, 8–10] в области лучевой медицины, спектроскопии ядер, а также в областях науки и техники, где используются трековые детекторы.

Приводим табл. 3, где показаны значения измерений количества треков частиц в кадре ПЗС-камеры методом поштучного счета и предложенным способом интегрального счета частиц, который при сканировании плоскости детектора сводится к одному отсчету количества черного в кадре ПЗС-камеры.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность генеральному директору ООО “ВИДЕОСКАН” В.П. Майорову за консультации и рекомендации по освоению нами работы с ПЗС-камерой, изготовленной под его руководством, а также сотруднику ОИЯИ (г. Дубна), начальнику сектора ЛФВЭ А.А. Балдину, за предоставленные образцы твердотельных детекторов, облученных на ускорителе ЛЯП ОИЯИ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Желтов С.Ю., Визильтер Ю.В. Машинное зрение: задачи и возможности. Технологии машинного зрения. Регистрация и анализ цифровых изображений. Препринт. Москва, МЭИ, 2001.
2. Алёшин Ю.Д., Колесников В.В., Силаев В.И. // ПТЭ. 1997. № 2. С. 43.
3. Смалюк В.В. Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях. Новосибирск: Параллель, 2009.

4. Алёшин Ю.Д., Исламов Т.А., Калинин В.Г. и др. // ПТЭ. 2001. № 3. С. 72.
5. Александров А.Б., Владимиров М.С., Гончарова Л.А. и др. Автоматизация измерений в толстослойных ядерных эмульсиях при продольном облучении ядрами с энергией 1 ГэВ на нуклон с целью получения обзорной информации по зарядовым состояниям вторичных частиц. Препринт. М.: ФИАН, 2007.
6. Бахмутова А.В., Дитлов В.А., Колыванова М.А. // ПТЭ. 2018. № 5. С. 107.  
<https://doi.org/10.1134/S0032816218050178>
7. Богаченко Д.Д., Дитлов В.А., Полозов П.А., Силаев В.И. РФ Патент 2776093, 2022.
8. Stelzer H. // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 1998. V. 61. P. 650.  
[https://doi.org/10.1016/S0920-5632\(97\)00633-6](https://doi.org/10.1016/S0920-5632(97)00633-6)
9. Torikoshi M., Minohara S., Kanematsu N., Komori M., Ranazawa M., Noda K., Miyahara N., Itoh H., Endo M., Kanai T.J. // J. Radiat. Res. 2007. V. 48. P. A15.  
<https://doi.org/10.1269/jrr.48.a15>
10. Akagi T., Higashi A., Tsugami H., Sakamoto H., Masuda Y., Hishikawa Y. // Phys. Med. Biol. 2003. V. 48. № 22. P. 301.  
<https://doi.org/10.1088/0031-9155/48/22/N01>

## ОПТИМАЛЬНЫЙ МЕТОД ИЗУЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПРИ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ

© 2025 г. С. Б. Шаулов<sup>а, \*</sup>

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

*\* e-mail: ser101@inbox.ru*

Поступила в редакцию 12.12.2024 г.

После переработки 16.01.2025 г.

Принята к публикации 13.02.2025 г.

Предложен метод определения энергетической зависимости ядерного состава космических лучей путем изучения стволов широких атмосферных ливней с помощью рентгеноэмульсионных камер. Новизна метода заключается в создании специализированной высокогорной установки и алгоритма сопоставления событий в рентгеноэмульсионной камере с широкими атмосферными ливнями. Проблема сопоставления связана с отсутствием временной селекции в рентгеноэмульсионных камерах. Объединение эмульсионных и ливневых событий позволяет создать новый тип высокогорной установки, наиболее чувствительной к энергетической зависимости состава космических лучей. Сопоставление проводится статистически. В рамках предложенного алгоритма получена оценка доли фона в сопоставленных событиях. Метод проверен при анализе событий эксперимента АДРОН на Тянь-Шане. Показано, что фон в статистике сопоставленных событий составляет не более 15%. Проведены две полугодовых и две годовых экспозиции рентгеноэмульсионной камеры площадью 162 м<sup>2</sup> каждая.

DOI: 10.31857/S0032816225030052

### 1. ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

Прямые измерения в космосе показывают, что космические лучи (КЛ) при энергиях ниже 10<sup>14</sup> эВ представляют собой поток в основном пяти групп ядер: протоны, He, CNO, Si, Fe [1]. Выше этой энергии КЛ изучаются с помощью регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ) в наземных экспериментах на уровне гор и моря. Косвенный метод исследований существенно осложняет получение надежной информации о составе и спектре КЛ. Одной из основных задач таких исследований является определение причины изменения наклона энергетического спектра КЛ при энергии 3 ПэВ (3 · 10<sup>15</sup> эВ), получившего название “колена” [2]. Резкое изменение наклона энергетического спектра КЛ  $dI/dE \sim E^{-\gamma}$  с  $\gamma = 2.7$  до  $\gamma = 3.1$  остается загадкой на протяжении 65 лет.

Решение проблемы связано с определением ядерного состава КЛ в области колена и зависи-

мости парциальных спектров ядер от первичной энергии  $E_0$ .

В работе формулируется новый метод регистрации и анализа характеристик ШАЛ, который можно рассматривать как оптимальный, так как он позволяет получать максимальную информацию об индивидуальных характеристиках наиболее энергичных адронов ливня. ШАЛ генерируется первичными ядрами и может быть представлен в виде двух компонент: ядерной (ствол ШАЛ) и электромагнитной (собственно ШАЛ). Схема ШАЛ приведена на рис. 1.

При анализе важны обе компоненты. Ствол содержит основную информацию о типе первичного ядра, а ШАЛ позволяет оценить его энергию  $E_0$  по числу заряженных частиц (электронов)  $N_e$  на уровне наблюдения, например  $E_0 = 0.018N_e^{0.87}$  ТэВ (1 ТэВ = 10<sup>12</sup> эВ).

Из всего многообразия детекторов заряженных частиц наибольшую информацию о стволе предоставляют рентгеноэмульсионные камеры

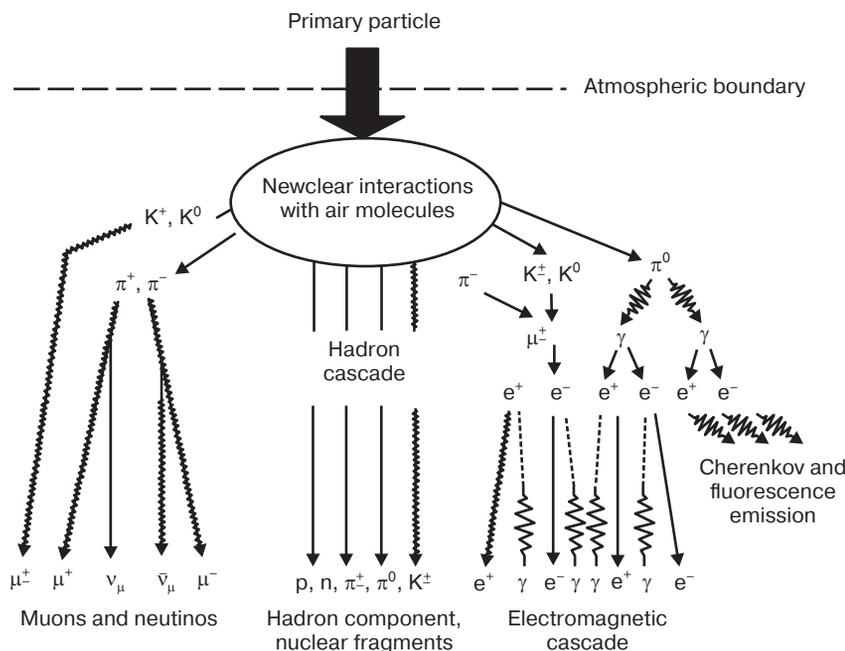


Рис. 1. Схема широкого атмосферного ливня.

(РЭК) [3, 4]. Уникальное пространственное разрешение рентгеновской пленки порядка 100 мкм позволяет регистрировать в РЭК отдельные адроны ствола, определять их энергию и угол прихода. В то же время эмульсионная методика обладает существенным недостатком. Отсутствие временной селекции не позволяет определять первичную энергию  $E_0$  для ШАЛ, образовавшего данное событие в РЭК.

События в РЭК представляют собой семейства частиц с энергиями выше нескольких ТэВ, имеющие одинаковые углы прихода и заключенные в круге радиусом  $R = 15$  см. Семейства в РЭК накапливаются в течение всей экспозиции, порядка года, поэтому, для того чтобы среди всей статистики ШАЛ, насчитывающей сотни тысяч ливней, найти именно тот ливень, который образовал данное семейство в РЭК, нужно было разработать конструкцию установки и соответствующий алгоритм сопоставления ШАЛ с событиями в РЭК.

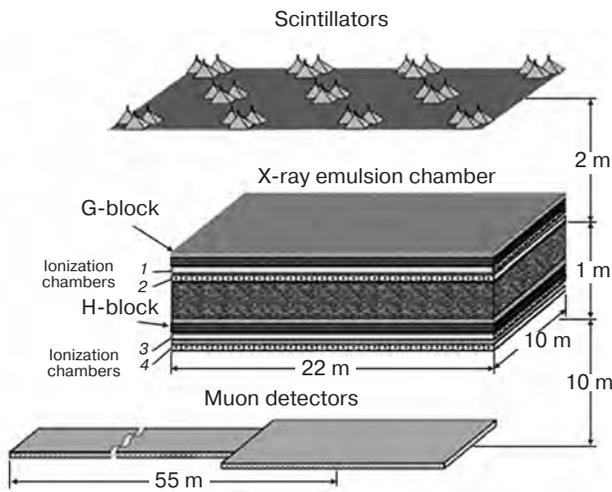
Задача осложняется тем, что для сопоставления можно использовать лишь два параметра: место попадания событий в установку  $R_{ц.т.}$  (ц.т. — центр тяжести) для ШАЛ и РЭК и углы их прихода  $\vartheta, \varphi$ . Остальные параметры ( $N_e$ , энергии семейств в РЭК  $\Sigma E_\gamma$  и т.п.) использовать нельзя, чтобы избежать искажения их распределений процедурой сопоставления.

## 2. КОНСТРУКЦИЯ УСТАНОВКИ

Критерий сопоставления создавался для высокогорной установки АДРОН (Тянь-Шань, 3340 м над уровнем моря). Конструкция установки разрабатывалась для получения объединенной информации о ШАЛ, соответствующих данным событиям в РЭК. Схема ее центральной части приведена на рис. 2.

Заряженные частицы ШАЛ регистрировались системой сцинтилляционных детекторов, расположенных в круге радиусом 70 м. При объединении ШАЛ и РЭК важную роль играют ионизационные камеры (ИК), образующие толчковую установку (ТУ). Четыре ряда ИК расположены крест-накрест по два ряда под гамма-блоком (G) и адронным блоком (H) РЭК. Размер ионизационного канала составлял  $9.0 \times 0.25 \times 0.05$  м<sup>3</sup>. Ширина канала 25 см и размер семейства в РЭК  $R = 15$  см были близки.

За исключением добавленных ИК, РЭК в остальном полностью повторяла конструкцию Памирской углеродной камеры [3, 4]. В гамма-блоке регистрировались каскады, генерируемые в свинце гамма-квантами, образованными при распаде  $\pi^0$ -мезонов ( $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ ). Заряженные пионы  $\pi^\pm$ , взаимодействуя в углеродном конвертере, образовывали  $\pi^0$ -мезоны, распад которых приводил к регистрации гамма-квантов в адронном блоке. Поэтому наблюдаемая энергия  $\pi^\pm$



**Рис. 2.** Центральная часть установки АДРОН. Сверху вниз: ливневая часть (сцинтилляторы); G-block (блок свинца толщиной 6 см для генерации гамма-квантами электромагнитных каскадов, создающих пятна потемнения на рентгеновской пленке, по характеристикам которых определялась энергия гамма-кванта от распада  $\pi^0$ ); два ряда ионизационных камер крест-накрест; слой резины толщиной 60 см, служивший конвертером  $\pi^\pm$ -мезонов в  $\pi^0$ , H-block (блок свинца толщиной 5 см для регистрации гамма-квантов от распада  $\pi^0$ , образованных в конвертере  $\pi^\pm$ -мезонами), два ряда ионизационных камер крест-накрест, подземный мюонный годоскоп гейгеровских счетчиков.

в РЭК составляла величину 0.2 от их реальной энергии.

Подземный мюонный годоскоп состоял из 1720 гейгеровских счетчиков СИ-5Г, расположенных на глубине 20 м водного эквивалента; он был предназначен для регистрации мюонов с энергиями  $E_\mu \geq 5$  ГэВ [5].

Установка обеспечивала точность положения оси ШАЛ  $\Delta R = 0.25$  м и центра тяжести семейства в РЭК  $\Delta R = 0.01$  м. Точность определения углов в ШАЛ составляла  $\Delta\theta = 8^\circ$ ,  $\Delta\phi = 12.5^\circ$ ; в РЭК —  $\Delta\theta = 3^\circ$ ,  $\Delta\phi = 8^\circ$ .

### 3. ПРОЦЕДУРА СОПОСТАВЛЕНИЯ СОБЫТИЙ В РЭК С ШАЛ

Задача сопоставления ШАЛ и РЭК решалась в три этапа: предварительный отбор ШАЛ, отбор ШАЛ по данным ИК в ТУ и отбор по критерию Неймана–Пирсона с использованием взаимных расстояний и углов событий.

Отбор ШАЛ, попавших в область РЭК, на первом этапе оставлял около 5% событий из примерно 200 000 ШАЛ. Дальнейший отбор велся с учетом положения оси ШАЛ в ТУ отно-

сительно события в РЭК и величины создаваемого им ионизационного толчка. При этом с увеличением энергии семейства частиц в РЭК  $\Sigma E_\gamma$  от 10 до примерно 100 ТэВ оставалось от 25 до 1 кандидата на сопоставление с данным событием в РЭК. Далее отбор истинного ШАЛ проводился по критерию Неймана–Пирсона.

#### 3.1. Отбор событий в РЭК

События в РЭК представляют собой генетически связанные семейства каскадов, образованных в свинце гамма-квантами энергий в диапазоне ТэВ, возникших в результате распада  $\pi^0$ -мезонов. В РЭК отбирались события с суммарной энергией  $\Sigma E_\gamma \geq 10$  ТэВ.

#### 3.2. Предварительный отбор ШАЛ

В установке АДРОН использовались два типа мастер-импульсов (триггеров) отбора событий для записи их в банк данных: ливневой и толчковый. Ливневой триггер отбирал около 200 000 ШАЛ/год в радиусе около 70 м. Чтобы выбрать ливни, попавшие в РЭК, был установлен дополнительный триггер, формировавшийся с помощью импульсов ИК. В толковой установке (ТУ) для каждой ИК устанавливалось пороговое условие, при превышении которого вырабатывался общий триггер на запись данного кадра в банк данных. Пороговые значения в рядах ИК 1–4 (сверху вниз) соответствовали числу релятивистских частиц  $1.3 \cdot 10^4$ ,  $9.8 \cdot 10^3$ ,  $5.9 \cdot 10^3$  и  $4.7 \cdot 10^3$ . В пересчете на энергию для уровня РЭК это соответствовало менее, чем 2 ТэВ, на всю площадь канала ( $2.25 \text{ м}^2$ ), что не могло ограничивать отбор кандидатов для сопоставления. Отбор оставлял около 5% всех событий.

#### 3.3. Отбор ШАЛ по характеристикам ТУ

Положение оси ШАЛ определяется ИК с максимальным значением импульса. Ширина ионизационного канала составляла 0.25 м, поэтому при поиске ШАЛ, соответствующего данному событию в РЭК, все ливни с осями вне квадрата  $0.37 \times 0.37 \text{ м}^2$  исключались.

Дальнейший отбор ШАЛ проводился с помощью введения понятия локализованного толчка, которое представляет собой поток энергии (числа частиц) в стволе ливня в области с размерами, сравнимыми с шириной канала (равной 0.25 м). Учитывая быстрое уменьшение числа частиц вблизи максимума ФПР ТУ, эту

величину приближенно можно получить, вычитая ионизацию соседнего канала из ионизации канала с максимальным ее значением. Учитывая возможное совпадение максимумов в двух соседних каналах, выражение для локальных толчков (ЛТ), можно записать в следующем виде:

$$E_{\text{ЛТ}} = \max \begin{cases} [N_{\text{max}} + 0.5(N_{\text{max}+1} + N_{\text{max}-1})] \cdot 2 \cdot 10^{-4} \text{ ТэВ} \\ [N_{\text{max}} + N_{\text{max}+1} - N_{\text{max}-1} - N_{\text{max}+2}] \cdot 10^{-4} \text{ ТэВ} \\ [N_{\text{max}} + N_{\text{max}}^{-1} - N_{\text{max}}^{-2} - N_{\text{max}}^{+1}] \cdot 10^{-4} \text{ ТэВ} \end{cases} \quad (1)$$

Здесь считается, что средняя энергия электронов на уровне ИК G-блока составляет 0.2 ГэВ [6]. Исключение ШАЛ по величине локализованных толчков зависело от энергии семейств, и критерий отбора был выбран достаточно мягким:

$$E_{\text{ЛТ}} \leq 0.5 \sum E_{\gamma} \quad (2)$$

Здесь ЛТ отбирается в квадрате  $0.25 \times 0.25 \text{ м}^2$ . Как показал анализ сопоставленных событий, исключение ШАЛ с ЛТ по этому критерию не вносит ограничений в процедуру сопоставления.

### 3.4. Сопоставление событий в РЭК с ШАЛ

Энергия семейств в РЭК меняется от 10 до нескольких сотен ТэВ. Для порогового значения  $\sum E_{\gamma}$  число оставшихся кандидатов ШАЛ может составлять до 25 ШАЛ на одно событие в РЭК. Однако с ростом  $\sum E_{\gamma}$  их число уменьшается вплоть до одного события. В дальнейшем при анализе характеристик событий в зависимости от  $N_e (E_0)$  в интервалы  $\Delta N_e$  попадают события с разной величиной  $\sum E_{\gamma}$ , так как корреляция между  $N_e$  и  $\sum E_{\gamma}$  довольно слабая. Сопоставление проводится путем сравнения положения оси ШАЛ с центром тяжести семейства РЭК и их углов прихода. Распределение ошибок для углов  $\vartheta$ ,  $\varphi$  имеет негауссову форму ( $\varphi = 0$  и  $\varphi = 360^\circ$  совпадают). Поэтому вместо углов  $\vartheta$  и  $\varphi$  используются углы  $\vartheta_x$  и  $\vartheta_y$ , возникающие при проекции оси ШАЛ на плоскости  $xz-\vartheta_x$  и  $yz-\vartheta_y$  в декартовой системе координат с началом пересечения осями ШАЛ плоскости РЭК.

## 4. ЭФФЕКТИВНОСТЬ И СТАБИЛЬНОСТЬ РАБОТЫ УСТАНОВКИ

Наличие РЭК предполагает высокогорное расположение установки (Тянь-Шань, 3340 м над уровнем моря). С увеличением глубины в атмосфере возрастает диссипация энергии вторичных

адронов, и они уходят под порог регистрации РЭК, поэтому чем выше расположена установка такого типа, тем эффективнее ее работа.

Кроме того, с учетом активности РЭК в течение всего времени экспозиции для сопоставления событий важным является требование непрерывной и стабильной работы установки ШАЛ в течение всего календарного времени. Обычная доля времени эксплуатации высокогорной установки ШАЛ с учетом повреждений аппаратуры грозами и ее ремонта, профилактики, нарушений электропитания и пр. составляла около 60%. Это заведомо недостаточно для решения задачи сопоставления событий. Для увеличения времени стабильной работы установки был принят ряд мер.

### 4.1. Обеспечение аппаратной стабильности работы установки

Во всех подсистемах широко использовалось дублирование аппаратуры. Полностью были продублированы система регистрации и сменные модули поканальной электроники детекторов, что обеспечивало их быструю замену в случае выхода из строя.

Для исключения грозовых наводок в длинных кабелях ставились оптические развязки — оптроны.

Работа всех подсистем была организована стандартным образом. При рассылке триггера входы всех подсистем блокировались, и пришедшие с них импульсы записывались в буферную память. При последовательном опросе информация переносилась в ЭВМ, где формировался кадр, содержащий информацию обо всех детекторах, который заносился в банк данных.

## 5. КОНТРОЛЬ РАБОТЫ УСТАНОВКИ

Контроль работы установки имел несколько уровней:

- при каждом срабатывании установки на экран дисплея выводилась информация обо всех детекторах;
- в каждой подсистеме имелись каналы с постоянными значениями сигналов (так называемые векторы), по которым контролировалась правильность считывания информации;
- на каждом кадре проводился контроль аппаратной готовности подсистем и правильности прохождения циклов опроса;

– накопление сбоев приводило к включению сигнализации;

– особый уровень контроля работы подсистем включал их тестирование путем подачи на вход стандартных импульсов (например, “шахматной доски”) с последующим чтением и контролем;

– основной контроль за стабильностью работы подсистем проводился с помощью ежедневного анализа физических спектров срабатывания всех каналов того или иного типа в течение сеанса (порядка 1000 событий). Выделенные каналы считались нерабочими, они не использовались в анализе и подлежали замене;

– на протяжении всех лет эксплуатации установки велось круглосуточное дежурство научно-инженерного персонала станции;

– принятые меры позволили увеличить эффективность работы установки ШАЛ с 60 до 90% календарного времени.

### 6. ФОРМУЛИРОВКА КРИТЕРИЯ НЕЙМАНА–ПИРСОНА

Для каждого события в РЭК необходимо найти всех возможных партнеров среди ШАЛ и выбрать партнера с максимальным значением критерия отбора. В теории принятия решений отмечается, что среди возможных критериев наименьшую ошибку сопоставления обеспечивает критерий Неймана–Пирсона [6]. Для его реализации необходимо вычислять вероятность истинной и ложной комбинаций событий.

Введем две гипотезы: пусть гипотеза  $H_0$  означает, что данная пара ШАЛ/РЭК<sub>j</sub> ложная, а гипотеза  $H_1$ , – что эта пара истинная. Критерий Неймана–Пирсона формулируется в виде следующей проверочной статистики  $l(\bar{x}, H_0, H_1)$ :

$$l(\bar{x}, H_0, H_1) = \frac{P(\bar{x}, H_1)}{P(\bar{x}, H_0)} \geq C_\alpha. \quad (3)$$

Если  $l(\bar{x}, H_0, H_1) \geq C_\alpha$ , то верна гипотеза  $H_1$ , т.е. ШАЛ<sub>i</sub>/РЭК<sub>j</sub> соответствуют друг другу. Если  $l(\bar{x}, H_0, H_1) < C_\alpha$ , то верна гипотеза  $H_0$ . При постоянном значении  $C_\alpha$  условие  $l(\bar{x}, H_0, H_1) \geq C_\alpha$  может выполняться для нескольких ШАЛ<sub>i</sub>, так как в зависимости от величины  $\Sigma E_\gamma$  число кандидатов меняется. В этом случае среди них выбирался ливень с максимальным значением проверочной статистики  $l_i$ .

В результате указанной процедуры каждому событию в РЭК с  $\Sigma E_\gamma \geq 10$  ТэВ ставится в соот-

ветствие ШАЛ. Объединенные события характеризуются как ливневыми параметрами, такими как число электронов  $N_e(E_0)$ , число мюонов  $N_\mu$ , возраст ливня  $s$  и т.п., так и параметрами стволов ШАЛ, такими как множественность вторичных адронов, их энергетические спектры, и многими другими параметрами, представляемыми событиями в РЭК [3].

Учитывая, что для каждого параметра сопоставления критерий имеет вид (3), можно записать общее выражение для условия отбора ШАЛ<sub>i</sub>:

$$l^j = \max (l_{\vartheta_x}^j, l_{\vartheta_y}^j, l_R^j) \Big|_{i=1}^n \geq C_\alpha. \quad (4)$$

Прежде чем выписывать конкретный вид этого условия, рассмотрим, как оно формируется для произвольного угла  $\vartheta$ . Обозначим угол, измеренный хронотроном в ШАЛ, как  $\vartheta_h = \vartheta_1$ , и угол, измеренный в РЭК, как  $\vartheta_e = \vartheta_2$ .

Если справедлива гипотеза  $H_0$ , то  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  независимы. Обозначим эту пару как  $\theta = (\vartheta_1, \vartheta_2)$ . Тогда вероятность иметь пару измерений дается выражением

$$P(\theta, H_0) = P_h(\vartheta_1) P_e(\vartheta_2), \quad (5)$$

где  $P_h$  и  $P_e$  – распределения плотности вероятности для углов ШАЛ и РЭК соответственно.

Если же справедлива гипотеза  $H_1$ , то существует истинное значение  $\vartheta = \vartheta_t$ , но в силу экспериментальных ошибок для ШАЛ имеем  $\vartheta = \vartheta_1$ , а для РЭК –  $\vartheta = \vartheta_2$ . В этом случае

$$P(\theta, H_1) = P(\vartheta_t) P(0 | \vartheta_t), \quad (6)$$

Значение  $\vartheta_t$  неизвестно, но в качестве его оценки может быть взято взвешенное среднее двух независимых измерений  $\theta$  [7]:

$$\vartheta_t \approx \frac{\vartheta_1 \sigma_2^2 + \vartheta_2 \sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}. \quad (7)$$

В этом случае

$$P(\vartheta_t, H_1) = P(\vartheta_t) \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2} \exp\left(-\frac{\Delta\vartheta}{2(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}\right), \quad (8)$$

где  $\Delta\vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1$ , а  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  – соответствующие ошибки определения углов. Тогда условие выполнения  $H_1$  выглядит следующим образом:

$$l(\vartheta_t, H_0, H_1) = \frac{P(\theta, H_1)}{P(\theta, H_0)} = \frac{P(\vartheta_t)}{P_h(\vartheta_1) P_e(\vartheta_2)} \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2} \exp\left(-\frac{\Delta\vartheta}{2(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}\right) \geq C_\alpha. \quad (9)$$

Аналогичным образом определяются проверочные статистики для всех параметров в  $\bar{x}$ :

$$l^{ij}(\vartheta^x) = \frac{P(\vartheta^x)}{P_h(\vartheta_1^x)P_e(\vartheta_2^x)} \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2} \exp\left(-\frac{\Delta\vartheta^x}{2(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}\right),$$

$$l^{ij}(\vartheta^y) = \frac{P(\vartheta^y)}{P_h(\vartheta_1^y)P_e(\vartheta_2^y)} \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2} \exp\left(-\frac{\Delta\vartheta^y}{2(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}\right), \quad (10)$$

$$l^{ij}(R) = \frac{S_0}{\Delta S} \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2} \exp\left(-\frac{\Delta R}{2(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}\right),$$

где  $S_0 = 162 \text{ м}^2$  – площадь установки,  $\Delta S = 0.25 \times 0.25 \text{ м}^2$  – пространственное разрешение толковой установки,  $\Delta R$  – расстояние между центром семейства в РЭК и центром тяжести в ТУ. Окончательно для  $j$ -го семейства в РЭК выбирается ШАЛ $_j$ , для которого наибольшее значение приобретает произведение всех проверочных статистик:

$$l_j = \max \left[ \left( l^{ij}(\vartheta^x) l^{ij}(\vartheta^y) l^{ij}(R) \right) \Big|_{i=1^n} \geq C_\alpha \right]. \quad (11)$$

Коэффициент  $C_\alpha$  подбирается экспериментально из соображений допустимой доли фона и эффективности сопоставления. Его конкретное значение большого значения не имеет, так как в каждом конкретном случае выбирается пара событий, имеющая максимальное значение критерия отбора. На этом процедура сопоставления заканчивается.

## 7. ОЦЕНКА ДОЛИ ФОНА

Перерывы в работе электроники являются одним из основных факторов, приводящих к возникновению фона ( $\eta$  – эффективность работы электроники). Однако фон присутствует даже при  $\eta = 1$  из-за статистического метода сопоставления событий. Причина заключается в возможном случайном вытеснении истинного ШАЛ фоновым.

Для определения реальной доли фона в сопоставленных событиях есть простой прием. Если изменить все координаты событий в РЭК и повторить процедуру сопоставления, то для данной статистики событий будет получено распределение фона. В результате был получен спектр фоновых событий, приведенный на рис. 3 вместе с истинным спектром, включающим также фоновые события.

Для событий с искаженными координатами эффективность сопоставления уменьшилась

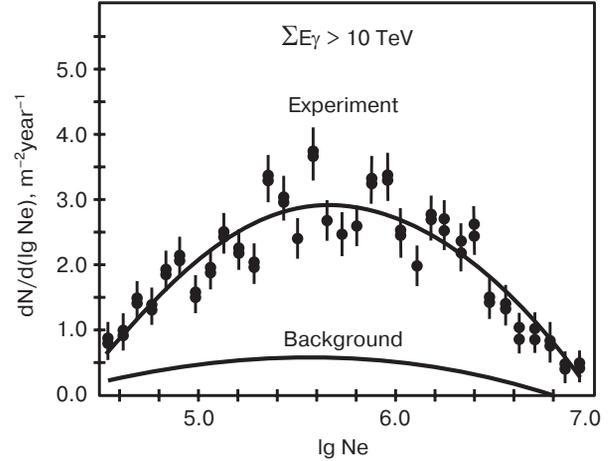


Рис. 3. Экспериментальный и фоновый спектры событий в РЭК с  $\Sigma E_\gamma \geq 10$  ТэВ.

примерно в шесть раз, т.е. фон составляет 15%. Кроме того, фоновый спектр более гладкий. Его вычитание из экспериментального спектра незначительно меняет интенсивность, и это не должно приводить к искажению формы спектра.

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен и опробован новый метод изучения космических лучей в области колена в спектре широких атмосферных ливней. Формулировке объединенного метода ШАЛ+РЭК в 1980-е гг. предшествовали детальное развитие метода ШАЛ в 1960-е гг. на Тянь-Шане [5] и метода РЭК в 1970-е гг. на Памире [3]. Поэтому формулировка объединенного метода явилась естественным продолжением указанных работ.

Проверка рассмотренного метода в рамках эксперимента АДРОН показала, что новая установка, объединяющая ливневую часть для регистрации ШАЛ и РЭК в качестве детектора стволов ШАЛ, значительно увеличивает информативность исследований и позволяет получать уникальные данные, ранее не доступные в экспериментах другого типа. Как это следует из работ [8, 9], новый тип установки позволяет существенно продвинуться в понимании природы колена в спектре ШАЛ. Далее представлены характеристики установки нового типа ШАЛ + ГАММА (ШАГ).

1. Для оценки первичной энергии  $E_0$  ливневая часть установки регистрировала полное число заряженных частиц  $N_e$  в ШАЛ, которое по модельным формулам переводилось в первичную энергию  $E_0$ .

2. Использование ИК увеличивало точность определения оси ШАЛ с 2 м до 0.25 м, что позволило уменьшить число кандидатов ШАЛ, соответствующих данному событию в РЭК.

3. Для уменьшения доли фона, т.е. неправильно сопоставленных событий, эффективность работы установки ШАЛ была увеличена с 60 до 90% календарного времени на протяжении экспозиции длиной порядка года.

4. За счет пространственного разрешения около 100 мкм при площади в сотни квадратных метров РЭК позволяет определять энергии, углы прихода и координаты индивидуальных каскадов, образованных гамма-квантами в свинце. Это максимально доступная информация о структуре стволов ШАЛ, что делает РЭК уникальным и незаменимым прибором для определения характеристик первичных частиц в КЛ.

5. Необходимую статистику событий обеспечивала РЭК площадью в 162 м<sup>2</sup>, экспонировавшаяся тремя экспозициями в течение двух лет.

6. Установка экспонировалась на уровне гор, так как высокий энергетический порог регистрации каскадов на пленке (несколько ТэВ) делает использование РЭК на уровне моря неэффективным.

7. Для отбора ШАЛ, соответствующего данному событию в РЭК, использовался критерий Неймана–Пирсона для двух параметров: поло-

жения оси ШАЛ относительно центра тяжести семейства в РЭК и углов прихода ШАЛ и события в РЭК.

8. Отбор ШАЛ с осями в РЭК осуществлялся специальным триггером, использующем данные ИК.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гинзбург В.Л., Сыроватский С.И. Происхождение космических лучей. Москва: Изд. АН СССР, 1963.
2. Куликов Г. В., Христиансен Г. Б. // ЖЭТФ. 1958. Т. 35. № 3(9). С. 635.
3. Байбурина С.Г., Борисов А.С., Гусева З.М. и др. // Труды ФИАН. 1984. Т. 154. С. 3.
4. Baradzei L.T. et al. Chacaltaya and Pamir Collaboration. Nuclear Phys. B. 1992. V. 370. P. 365.
5. Стаменов Й.Н., Георгиев Н.Х., Кабанова Н.В. и др. // Труды ФИАН. 1979. Т. 109. С. 132.
6. Адамов Д.С. Дисс... канд. физ.-мат. наук. М.: ФИАН, 1990.
7. Идье В., Драйард Д., Джеймс Ф., Рус М., Садуле Б. Статистические методы в экспериментальной физике. М.: Атомиздат, 1976.
8. Shaulov S.B., Kupriyanova E.A., Ryabov V.A. et al. J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2021. V. 48. P. 125202. <https://doi.org/10.1088/1361-6471/ac2e58>
9. Шаулов С.Б., Рябов В.А., Щенетов А.Л. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2022. Т. 116. С. 3.

## ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ИЗМЕРЕНИЙ МОЩНОСТИ ОРОТРОНОВ ДВУХМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

© 2025 г. Е. А. Мясин<sup>а</sup>\*, А. Ю. Ильин<sup>а</sup>, Н. А. Максимов<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова  
Российской академии наук

Россия, 141190, Фрязино, Московская обл., пл. Введенского, 1

\* e-mail: eam168@ms.ire.rssi.ru

Поступила в редакцию 27.12.2024 г.

После доработки 18.03.2025 г.

Принята к публикации 08.03.2025 г.

Предложен подход для коррекции результатов измерений выходной мощности оротронов с двухрядной периодической структурой, выполненных с помощью градуированной детекторной секции в волноводе с поперечным сечением  $1.6 \times 0.8 \text{ мм}^2$  с учетом расположения детектора в середине широкой стенки волновода. Приведены результаты реализации такого подхода при коррекции измерений выходной мощности оротрона двухмиллиметрового диапазона длин волн.

DOI: 10.31857/S0032816225030066

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] были проведены измерения мощности генерации оротрона с двухрядной периодической структурой (ДРПС) в диапазоне частот от 180 до 400 ГГц с помощью волноводной градуированной детекторной секции с поперечным сечением волновода  $1.6 \times 0.8 \text{ мм}^2$ . Но поскольку этот волновод становится уже на частоте около 200 ГГц сверхразмерным, необходимо было учесть при измерениях то обстоятельство, что детектор находится в середине широкой стенки волновода, что не было сделано, так как основное внимание было направлено на увеличение верхней границы перестройки частоты. Поэтому в приложении работы [1] была установлена определенная закономерность в соотношении между волноводной длиной волны и размером широкой стенки волновода, в середине которой расположен детектор. На основе анализа этой закономерности был предложен метод учета ее влияния на результат измерения мощности генерации оротрона. Для описания этой закономерности предлагалось введение корректирующей функции  $F$ , определяющей возможное максимальное значение измеряемой величины

как при совпадении ее с координатой середины широкой стенки волновода, т.е. местом расположения детектора, так и при несовпадении. В последнем случае истинное значение измеряемой величины должно определяться умножением ее на величину, обратную  $F$ , т.е. на  $1/F$ .

### 2. ТЕОРИЯ

Очевидно, что функция  $F$  должна быть тригонометрической (либо  $\cos \alpha$ , либо  $\sin \alpha$ ). Как будет видно, для дальнейшего рассмотрения необходимо использовать  $\sin \alpha$ . Поскольку в прямоугольном волноводе с поперечным сечением  $a \times b \text{ см}^2$ , где  $a$  — широкая стенка волновода, поперечное распределение ВЧ-поля вдоль нее соответствует половине длины волны типа  $H_{10}$  ( $\lambda_{\text{в}}/2$ , т.е. половине периода синусоиды), положение середины широкой стенки волновода ( $a/2$ ), где расположен детектор, соответствует величине  $\lambda_{\text{в}}/4$ . Поэтому регистрируемая мощность генерации на длине волны в свободном пространстве будет всегда иметь максимальное значение в случае совпадения ее длины волны с волноводной  $\lambda_{\text{в}} = 2a$ . Поэтому новая функция  $F$  (будем называть ее специальной) должна быть записана так:

$$F = \left| \sin \left[ \left( \frac{\pi}{a} \right) \lambda_b / 4 \right] \right|,$$

т.е. она отражает тот факт, что максимальное значение этой функции, равное единице, располагается в середине широкой стенки волновода, где расположен детектор. В аргументе функции  $F$  присутствует величина  $\pi/a$ , так как  $a$  – половина длины волны  $\lambda_b$  типа  $H_{10}$ .

При  $\lambda_b = 2a$  выполняется равенство

$$\sin \left[ \left( \frac{\pi}{a} \right) \lambda_b / 4 \right] = \sin \left[ \left( \frac{\pi}{a} \right) 2a / 4 \right] = 1.$$

Эта ситуация соответствует существованию одного максимального значения этой функции при этой волноводной длине волны типа  $H_{10}$  с максимумом в середине широкой стенки  $a$  волновода. Нетрудно определить эту волноводную длину волны:  $\lambda_b = 2a = 3.2$  мм. Для всех длин волн, отличных от  $\lambda_b$ , результат измерения должен быть скорректирован, т.е. умножен на корректирующую функцию  $1/F$ . Таким образом, результат измерения необходимо увеличить в  $1/\sin \left[ \left( \frac{\pi}{a} \right) \lambda_b / 4 \right]$  раз. Теперь по известной формуле можно вычислить соответствующую длину волны  $\lambda_0$  в свободном пространстве:

$$\lambda_0 = \lambda_b / \sqrt{1 + \left( \lambda_b / \lambda_{кр} \right)^2}.$$

Тогда для  $\lambda_b = 3.2$  мм получаем значение длины волны  $\lambda_0 \approx 2.262$  мм, т.е.  $f = 132.5825$  ГГц, что соответствует середине двухмиллиметрового диапазона длин волн, и это означает, что коррекция измерений будет проходить в двухмиллиметровом диапазоне, для работы в котором и предназначен волновод сечением  $1.6 \times 0.8$  мм<sup>2</sup>.

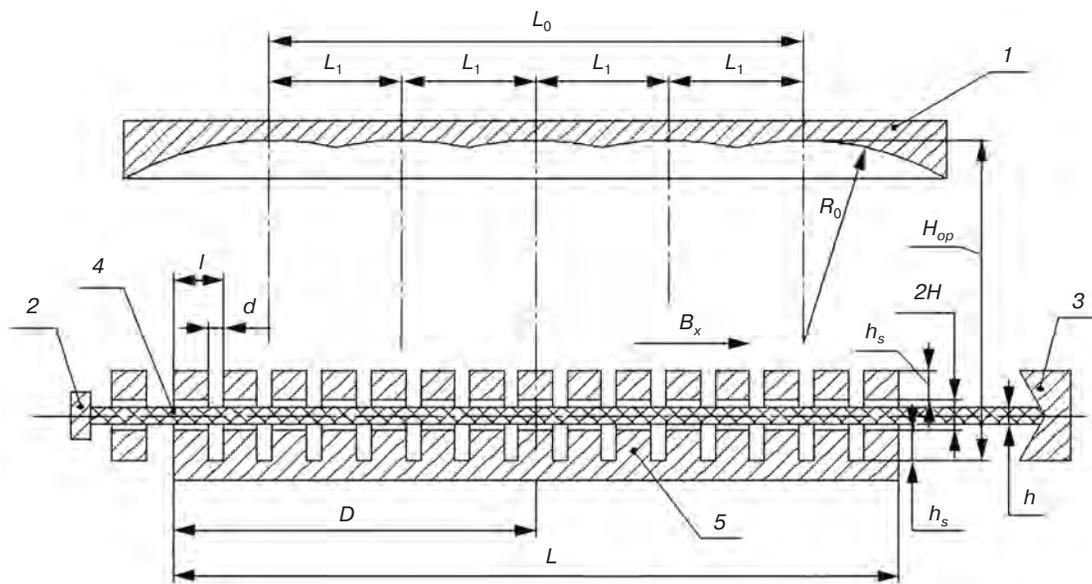
### 3. ЭКСПЕРИМЕНТ

Цель данного эксперимента – показать необходимость коррекции результатов измерений мощности на данной длине волны, генерируемой оротроном с ДРПС, полученных без учета уменьшения регистрируемой мощности, в зависимости от расположения максимума половины волноводной длины относительно середины широкой стенки волновода размерами  $1.6 \times 0.8$  мм<sup>2</sup>, где размещен детектор. Для определения мощности, генерируемой оротроном с ДРПС, использовалась методика работы [1]. Для расчета мощности излучения на некоторых частотах диапазона перестройки сначала измерялась мощность потерь в СВЧ-тракте между выходным фланцем вывода энергии оротрона с ДРПС и волноводной детекторной секцией (ДС), а затем с использованием градуировки ДС

по значению амплитуды сигнала ДС на данной частоте определялась мощность генерируемого излучения. Важно отметить, что для использования градуировки необходимо, чтобы детектор работал в квадратичном режиме. Поскольку измерения проводились на том же экспериментальном стенде, что и в работе [1], это требование в процессе измерений неукоснительно соблюдалось, и уровень напряжения на детекторе, соответствующий границе его квадратичной работы, никогда не нарушался. Таким образом, между напряжением на детекторе и потерями мощности в волноводном тракте с помощью градуировки устанавливается линейная зависимость, и величину генерируемой мощности для нашей цели можно не вычислять, так как коррекция амплитуды эквивалентна коррекции мощности. Для примера коррекции результатов измерения мощности рассмотрим реальный процесс генерации в оротроне с ДРПС [2], схематическое изображение которого представлено на рис. 1.

Эксперимент проводился на стенде, содержащем высоковольтный источник питания и вакуумную камеру, в которой при непрерывной откачке обеспечивался высокий вакуум (давление  $10^{-8}$  мм рт. ст.). В этой камере располагался макет оротрона. Прибор работал во внешнем магнитном поле напряженностью около 7 кГс, создаваемом электромагнитом. Напряжение подавалось от высоковольтного модулятора, обеспечивающего работу в импульсном режиме с большой скважностью (длительность импульса напряжения 2 мкс, частота следования импульсов 50 Гц). Частота генерации оротрона могла перестраиваться от 104 до 127 ГГц за счет изменения расстояния между зеркалами открытого резонатора с одновременным изменением напряжения в диапазоне от 9 до 18 кВ. Регистрация генерируемой мощности излучения проводилась с помощью наблюдения амплитуды сигнала на осциллографе с выхода градуированной волноводной детекторной секции двухмиллиметрового диапазона с поперечным сечением волновода  $1.6 \times 0.8$  мм<sup>2</sup>. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Как следует из табл. 1, минимальное значение корректирующей функции  $1/F \approx 1$  достигается при максимальной частоте генерации  $f = 127.76$  ГГц, волноводная длина волны которой имеет минимальное значение, близкое к  $\lambda_b = 3.2$  мм.



**Рис. 1.** Схема конструкции оротрона с фокусирующим пяти фокусным зеркалом: 1 – фокусирующее зеркало, 2 – катод, 3 – коллектор, 4 – электронный поток, 5 – двухрядная периодическая структура (ДРПС) на плоском зеркале.

**Таблица 1.** Результаты измерений

$f$ , ГГц	$\lambda_b$ , мм	$A$ , мВ	$\lambda_0 = \lambda_b / \sqrt{1 + (\lambda_b / \lambda_{кр})^2}$	$F = \sin [(\pi/a)\lambda_b/4]$	$1/F$	$A_{кopp} = A/F$ , мВ
104	2.88	15	6.6	0.092	10.2	153
108.23	2.772	150	5.548	0.406	2.463	369.5
119	2.52	300	4.088	0.906	1.1	330
123.96	2.42	330	3.648	0.97	1.03	340
127.76	2.348	620	3.455	0.992	1.008	620

Однако необходимо проверить границу области применимости предлагаемой корректирующей функции, так как она определяется зависимостью  $1/F = 1/\sin \alpha$  и может стремиться к бесконечности при малых значениях  $\sin \alpha$ .

Для определения области применения этой функции нужно использовать градуировку нашей детекторной секции, представленную на рис. 2.

В соответствии с градуировкой детекторной секции при  $P_0 = 5$  мВт разница в чувствительности детектора на частотах 127.76 и 119 ГГц составляет около  $6.2/5.7 = 1.0877 \approx 1.09$ , что соответствует разнице при вычислении значений мощности (рис. 2). При корректировке измерений мощности, проведенной с помощью предлагаемой методики, эта разница в чувствительности в соответствии с табл. 1 составляет  $330 \text{ мВ} / 300 \text{ мВ} \approx 1.1$ .

Теперь и в том, и в другом случаях необходимо учесть влияние потерь в коротком волно-

водном тракте от выходного фланца прибора до детекторной секции. Поскольку длина волны  $\lambda_c$  середины диапазона обычно имеет значение  $\lambda_c = 0.75a = 2.133$  мм, для низкочастотного края двухмиллиметрового диапазона для частоты 127.76 ГГц длина волны составит  $\lambda = 2.34$  мм, а для частоты 119 ГГц имеем  $\lambda = 2.52$  мм. Поскольку обе длины волны находятся недалеко от критической длины волны  $\lambda_{кр} = 3.2$  мм ( $\lambda_0 = 2.262$  мм) и близко друг к другу, потери в этом волноводном тракте на единицу длины можно считать одинаковыми.

Таким образом, можно считать, что разница между измерением потерь на частоте 119 ГГц с использованием градуированной детекторной секции (примерно в 1.09 раза) и предлагаемой методикой (1.1 раза) одинакова. Следовательно, частота 119 ГГц является граничной частотой, до которой предлагаемой методикой можно пользоваться.

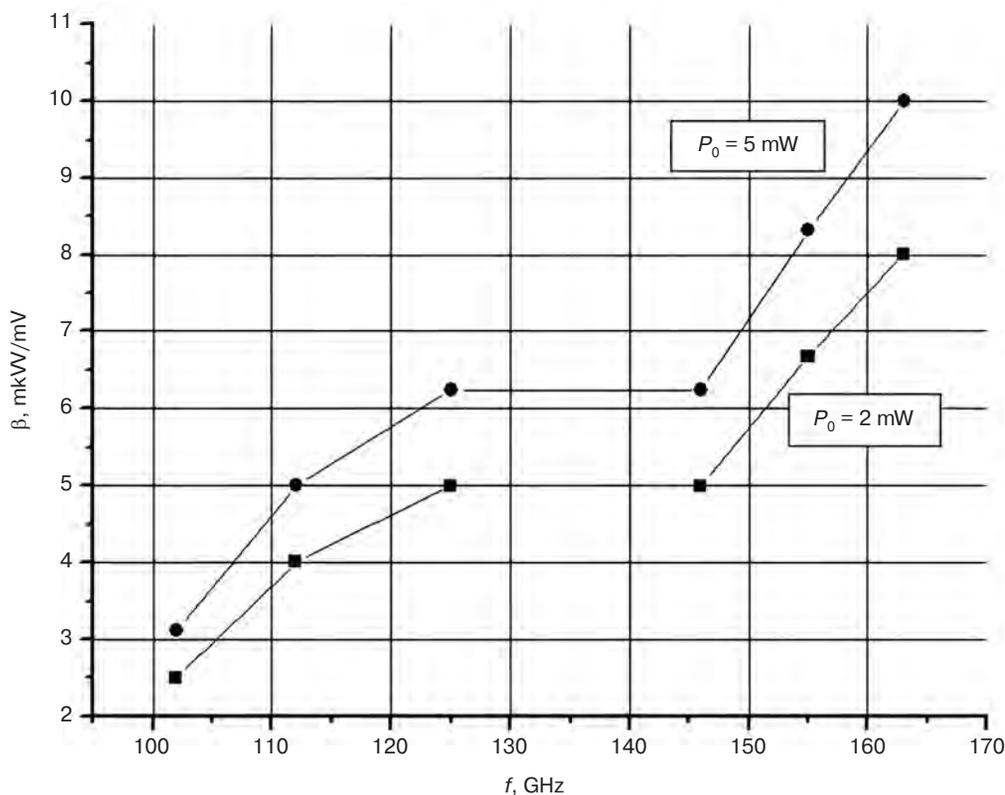


Рис. 2. Градуировка волноводной детекторной секции  $1.6 \times 0.8$  мм<sup>2</sup>.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из проведенного рассмотрения следует, что при широкодиапазонной перестройке источников СВЧ в двухмиллиметровом диапазоне с использованием детекторной секции с детектором в середине широкой стенки волновода нет необходимости проводить коррекцию этих измерений во всем низкочастотном диапазоне перестройки (от 127.76 до 104 ГГц), так как граница применимости предлагаемой методики ограничена частотой 119 ГГц. Но на частоте 119 ГГц эту коррекцию нужно проводить, если требуется точность измерения до 10%. Этот результат можно использовать и для коррекции измерений с помощью детекторных секций, построенных по этому принципу, в прямоугольных волноводах других диапазонов.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю благодарность А.А. Негиреву за градуировку нашей детекторной секции.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мясин Е.А., Евдокимов В.В., Ильин А.Ю. // ПТЭ. 2023. № 2. С. 58. <https://doi.org/10.31857/S0032816223020088>
2. Мясин Е.А. // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53. № 9. С. 1.

## ГЕНЕРАТОР МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ С НАНОСЕКУНДНЫМ ФРОНТОМ НА ОСНОВЕ БЛОКОВ ДИНИСТОРОВ С УДАРНОЙ ИОНИЗАЦИЕЙ

© 2025 г. С. В. Коротков<sup>а, \*</sup>, А. Л. Жмодиков<sup>а</sup>, К. А. Козлов<sup>а</sup>, Д. А. Коротков<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук  
Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

\* e-mail: korotkov@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 12.02.2025 г.

После доработки 17.02.2025 г.

Принята к публикации 04.03.2025 г.

Показана возможность эффективного использования принципа импульсного умножения напряжения в генераторах мощных наносекундных импульсов на основе высоковольтных блоков динисторов с ударной ионизацией. Описаны электрическая схема и конструкция генератора, содержащего коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 75 Ом и 4 модуля с рабочим напряжением 10 кВ. Модули включаются эстафетно, в каждом модуле используются блок динисторов и блок конденсаторов с емкостью 8.8 нФ. Приведены результаты экспериментального исследования генератора. Когда кабель подключен к резистору с сопротивлением 75 Ом, генератор обеспечивает формирование импульсов выходного напряжения с амплитудой приблизительно 38 кВ, фронтом длительностью около 4.5 нс и длительностью по полувысоте примерно 145 нс. Разброс выходных импульсов (джиттер) не превышает 2 нс. При подключении кабеля к искровому разряднику генератор способен работать в широком диапазоне изменений напряжения пробоя разрядника, а также в режиме холостого хода, при котором амплитуда напряжения на конце кабеля достигает величины, близкой к 80 кВ. Показана возможность масштабирования выходных параметров генератора.

DOI: 10.31857/S0032816225030074

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время мощные наносекундные импульсы широко используются для создания электрических разрядов в технологических и экспериментальных устройствах. В этих устройствах заполненный газом межэлектродный промежуток пробивается при приложении импульса напряжения. После пробоя в канал разряда вкладывается требуемая энергия. Производительность устройств повышается при увеличении объема образованной неравновесной плазмы, который определяется расстоянием между электродами. При увеличении межэлектродного расстояния повышается напряжение пробоя и снижается стабильность разрядного процесса, что требует генерации импульсов

высокого напряжения с достаточно большой длительностью, которая должна превышать максимально возможную длительность задержки пробоя. Высокая эффективность плазменных технологий достигается при создании большой напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке. Для этого скорость нарастания инициирующего пробой импульса напряжения должна быть велика, чтобы за время развития предпробойного процесса напряжение на промежутке успело нарасти до достаточно высокого значения. Для решения ряда специальных задач требуется строго одновременное формирование нескольких разрядов или последовательности разрядов, следующих с заданной задержкой друг относительно друга. В этих условиях разброс моментов генерации высо-

ковольтных импульсов (джиттер) должен быть очень мал.

Таким образом, генераторы электрических разрядов должны формировать выходные импульсы напряжения, имеющие высокую амплитуду, малый фронт, достаточно большую длительность и малый джиттер. Этим требованиям в наибольшей степени удовлетворяют генераторы на основе полупроводниковых приборов. В настоящее время в наносекундном диапазоне наибольшую энергию позволяют коммутировать полупроводниковые генераторы с размыкающими коммутаторами в виде блоков диодов с наносекундным временем выключения [1, 2] и с замыкающими коммутаторами в виде блоков четырехслойных полупроводниковых приборов с наносекундным временем включения [3–5].

В работе [6] описан мощный генератор на основе динисторов типа SID (shock ionized dynistors), которые включаются за время около 1 нс при приложении наносекундного импульса перенапряжения, инициирующего процесс ударной ионизации. Генератор при нагрузке 30 Ом формировал импульсы напряжения с амплитудой примерно 25 кВ и фронтом длительностью около 4 нс. Он был выполнен по схеме Маркса и состоял из четырех модулей, включающихся эстафетно. Каждый модуль содержал блок последовательно соединенных SID с рабочим напряжением 8 кВ и накопительный конденсатор с емкостью 2.2 нФ. Конденсаторы модулей заряжались одним импульсом тока за время около 15 мкс. Определенным недостатком такого решения являлось то, что в интервале времени между моментами окончания зарядки и включения генератора накопительные конденсаторы частично разряжались через блоки SID и элементы цепи зарядки. В результате при изменении момента включения генератора менялась амплитуда импульса выходного напряжения.

В настоящей статье приведены результаты исследования аналогичного генератора, в котором энергоемкость модулей была увеличена в шесть раз. Принципиальным отличием разработанного генератора является то, что зарядка накопительных конденсаторов осуществляется с помощью высокочастотного зарядного устройства, которое обеспечивает высокую стабильность величины зарядного напряжения. В результате достигается высокая повторяемость параметров выходных импульсов в режимах

работы генератора при изменении моментов его включения.

## 2. ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА

Электрическая схема генератора показана на рис. 1. В состав схемы входят основной блок, содержащий накопительные конденсаторы  $C_{01}–C_{04}$ , динисторные блоки  $SID_1–SID_4$  и запускающие конденсаторы  $C_{y1}–C_{y3}$ , а также блок управления (БУ), коаксиальный кабель (КК) и высокостабильные блоки зарядки (БЗ, БЗ<sub>0</sub>). В исходном состоянии к блоку БУ приложено входное напряжение  $U = 2$  кВ, а конденсаторы основного блока заряжены до напряжения  $U_0 = 10$  кВ. Напряжение  $U_0$  прикладывается к динисторным блокам, содержащим пять последовательно соединенных SID. Резисторы  $R$  обеспечивают равномерное распределение напряжения  $U_0$  между SID. Цепь  $D–R_1$  исключает возможность приложения к блоку БУ выходного напряжения блока БЗ<sub>0</sub>.

Динисторные блоки включаются эстафетно. Сначала с помощью блока управления включается блок  $SID_1$ . Последующее включение блоков  $SID_2–SID_4$  осуществляется волной перенапряжения, которая формируется с помощью запускающих конденсаторов  $C_{y1}–C_{y3}$ .

Блок БУ выполнен по схеме, описанной в работе [7]. Он содержит диодный блок DSRD (drift step-recovery diodes), формирующий импульсы высокого напряжения с фронтом несколько нс, цепь  $C_1–L_1–C_2–L_2$  и тиристор  $T$ , обеспечивающий коммутацию принципиально коротких импульсов тока, необходимых для эффективной работы блока DSRD. Малые коммутационные потери энергии в тиристоре  $T$  достигаются с помощью цепи управления ЦУ, которая формирует мощные импульсы тока управления с амплитудой около 6 А и фронтом длительностью примерно 300 нс. Включение ЦУ осуществляется оптическим сигналом от внешнего генератора импульсов управления.

После включения тиристора  $T$  конденсатор  $C_1$  быстро перезаряжается до существенного обратного напряжения. Ток перезарядки протекает через индуктивность  $L_1$  и цепь DSRD– $L_2–C_2$ . В результате происходит зарядка конденсатора  $C_2$ , и через блок DSRD в течение нескольких сотен наносекунд протекает прямой ток. Этот ток обеспечивает накопление заряда электронов и дырок в базовых областях диодов.

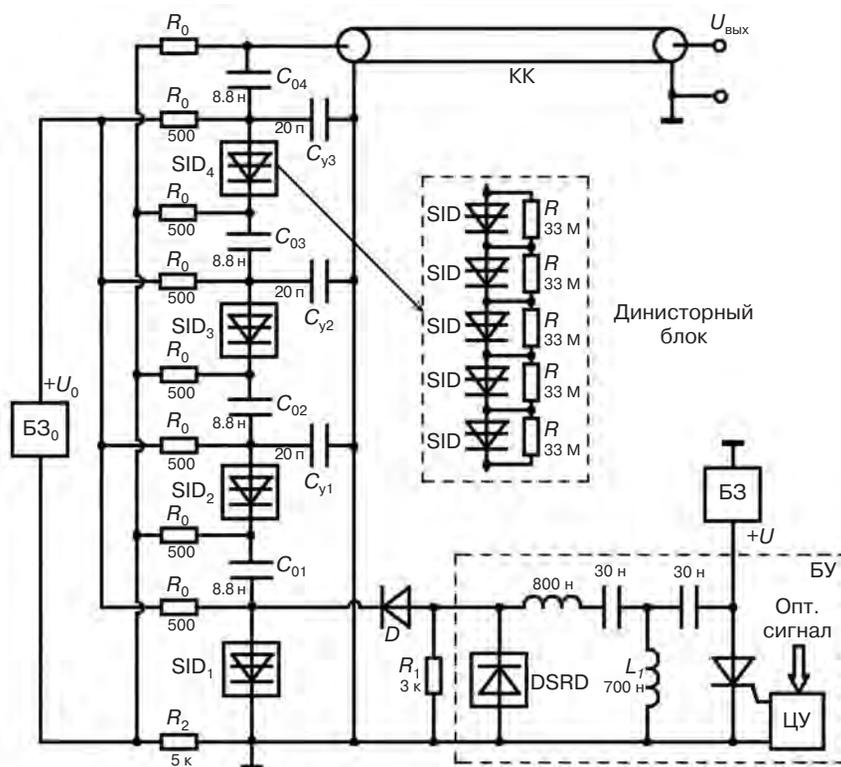


Рис. 1. Электрическая схема генератора:  $D$  – К100F; DSRD – 36 диодных структур с диаметром 20 мм; SID – диаметр структуры 16 мм, предельно допустимое напряжение в стационарном состоянии 2.5 кВ;  $T$  – ТБ133-25-24; КК – РК75-9-12.

Затем накопленный заряд выносится быстро нарастающим обратным током, который формируется при разряде конденсаторов  $C_1$ ,  $C_2$  через индуктивность  $L_2$ . Когда из диодных структур выносится весь накопленный заряд, блок DSRD выключается.

В процессе выключения блока DSRD протекающий через индуктивность  $L_2$  ток коммутируется в блок SID<sub>1</sub> и быстро заряжает собственные емкости диносторов этого блока до напряжения, инициирующего их включение. В процессе включения диносторов проводимость блока SID<sub>1</sub> резко увеличивается, и конденсаторы  $C_{y1}$ ,  $C_{01}$  разряжаются по цепи  $C_{01}$ –SID<sub>1</sub>– $C_{y1}$ –SID<sub>2</sub>. В результате напряжение на блоке SID<sub>2</sub> быстро нарастает до напряжения включения. После включения блока SID<sub>2</sub> через собственные емкости диносторов блока SID<sub>3</sub> протекает ток разряда конденсаторов  $C_{y2}$ ,  $C_{02}$ ,  $C_{01}$ . Эти емкости быстро заряжаются, напряжение на блоке SID<sub>3</sub> резко нарастает, он включается и создает условия для эстафетного включения блока SID<sub>4</sub>. После включения блока SID<sub>4</sub> в кабель КК коммутируется импульс тока разряда последовательно соединенных конденсаторов  $C_{01}$ – $C_{04}$ . В резуль-

тате на входе КК формируется импульс высокого напряжения  $U_{\text{КК}}$ . Поскольку время включения SID очень мало, длительность фронта  $U_{\text{КК}}$  в основном определяется величиной монтажной индуктивности цепи разряда накопительных конденсаторов.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 2 показаны осциллограммы напряжения  $U_1$ – $U_4$  на блоках SID<sub>1</sub>–SID<sub>4</sub>, иллюстрирующие процесс их переключения. Они получены при использовании лабораторного делителя [8] с сопротивлением около 500 Ом. Делитель позволял достоверно измерять сигналы с фронтом длительностью более 0.5 нс, он подключался к блокам через разделительный конденсатор.

Из осциллограмм на рис. 2 следует, что напряжение включения диносторных блоков, состоящих из пяти последовательно соединенных SID, составляет примерно 22 кВ. Если считать, что оно делится равномерно между диносторами, то напряжение включения SID составляет при-

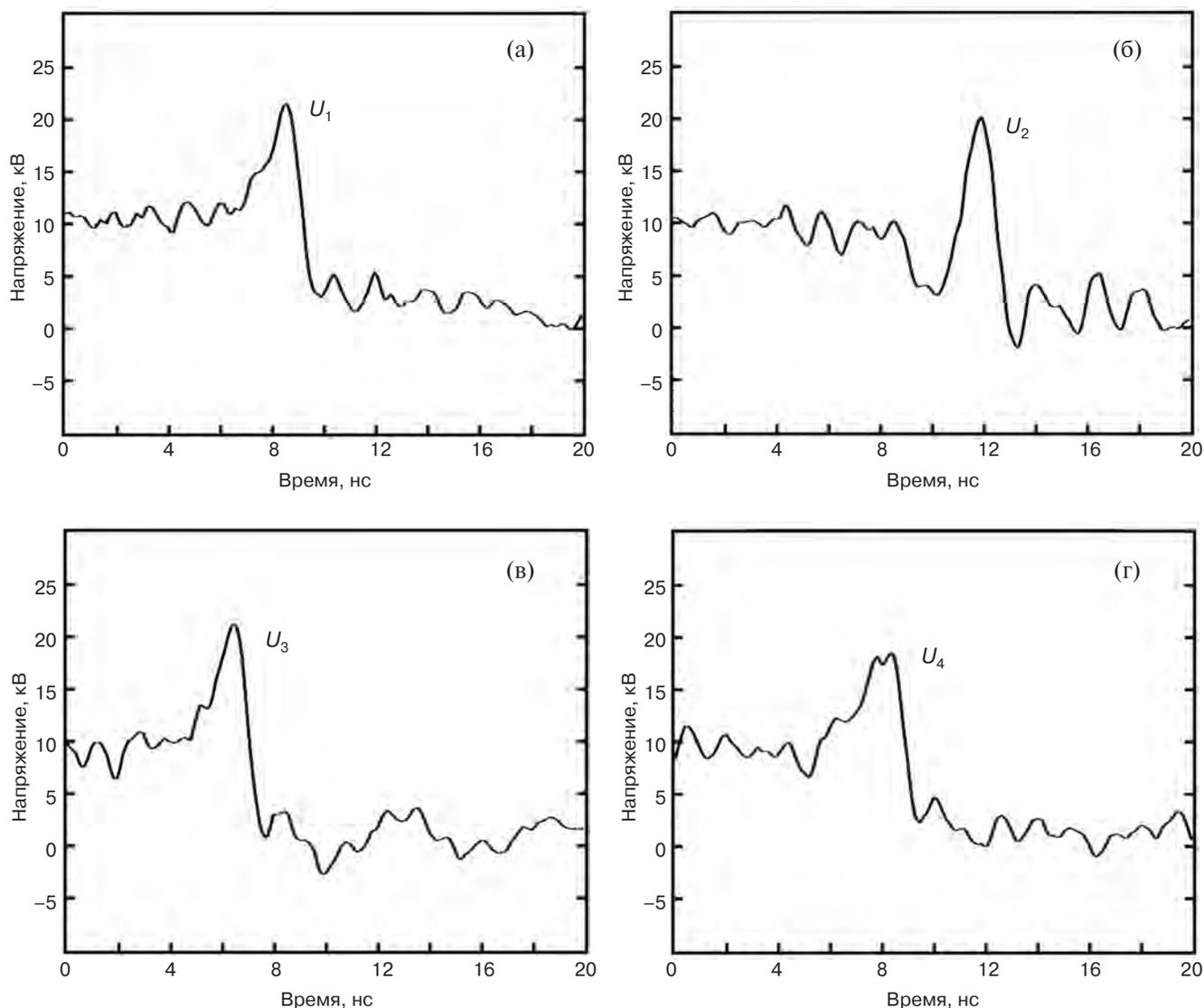


Рис. 2. Осциллограммы напряжения на блоках SID<sub>1</sub> (а), SID<sub>2</sub> (б), SID<sub>3</sub> (в), SID<sub>4</sub> (г).

мерно 4.4 кВ, что почти в 1.8 раза превышает величину напряжения, которое он способен блокировать в стационарном состоянии.

В процессе запуска блоков SID время нарастания напряжения от исходной величины 10 кВ до напряжения включения составляет примерно 2 нс, время включения блоков SID не превышает 1 нс. Уменьшение напряжения на блоке SID<sub>2</sub> в процессе нарастания напряжения на блоке SID<sub>1</sub> свидетельствует о том, что часть выходного тока БУ замыкается по цепи SID<sub>2</sub>–C<sub>y1</sub>.

На рис. 3 приведена осциллограмма импульса выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$ , измеренного щупом Tektronix P6015A на резисторе с сопротивлением 75 Ом, который был подключен к концу кабеля КК. Кабель имел волновое сопротивление 75 Ом и длину 3.5 м.

Как следует из осциллограммы, выходное напряжение генератора быстро нарастает; оно достигает максимального значения 38 кВ за время, меньшее 5 нс. Затем  $U_{\text{вых}}$  медленно спадает, и через 80 нс после максимума это напряжение составляет не менее чем 24 кВ.

Полученный результат позволяет эффективно использовать генератор для создания мощных электрических разрядов. Этому способствует и то обстоятельство, что до момента пробоя межэлектродного промежутка генератор работает в режиме холостого хода. В этом режиме амплитуда напряжения на конце КК может в два раза превысить амплитуду напряжения на входе кабеля.

На рис. 4 показаны осциллограммы импульсов выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  и импульсов

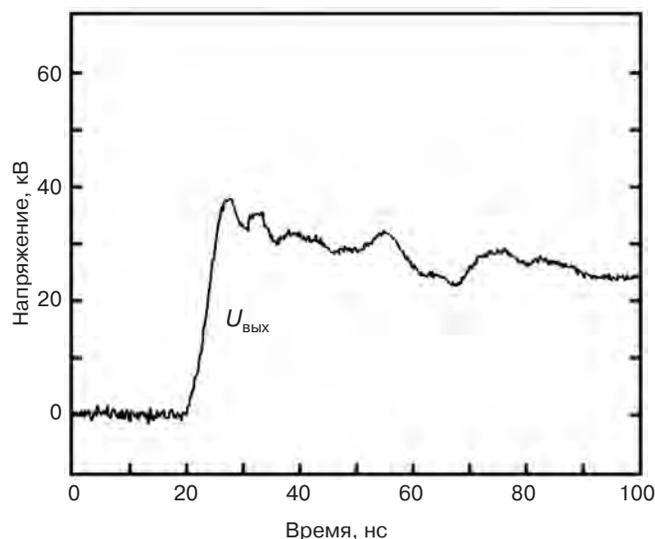


Рис. 3. Осциллограмма импульса выходного напряжения при подключении кабеля к резистору с сопротивлением 75 Ом.

напряжения  $U_{\text{кк}}$  на входе КК, полученные при подключении кабеля к искровому разряднику. В эксперименте, который соответствовал осциллограммам на рис. 4а, 4б, разрядник пробивался при большем значении выходного напряжения по сравнению с экспериментом, который соответствовал осциллограммам на рис. 4в, 4г. Сравнение осциллограмм на рис. 4б, 4г показывает, что при существенном увеличении амплитуды импульса выходного напряжения амплитуда импульса напряжения на входе кабеля изменяется незначительно. В результате обеспечивается высокая надежность основного блока генератора, соединенного со входом КК.

Осциллограммы на рис. 4 измерялись с помощью пробника Tektronix P6015A, который подключался к нижнему плечу высоковольтного резистивного делителя с сопротивлением

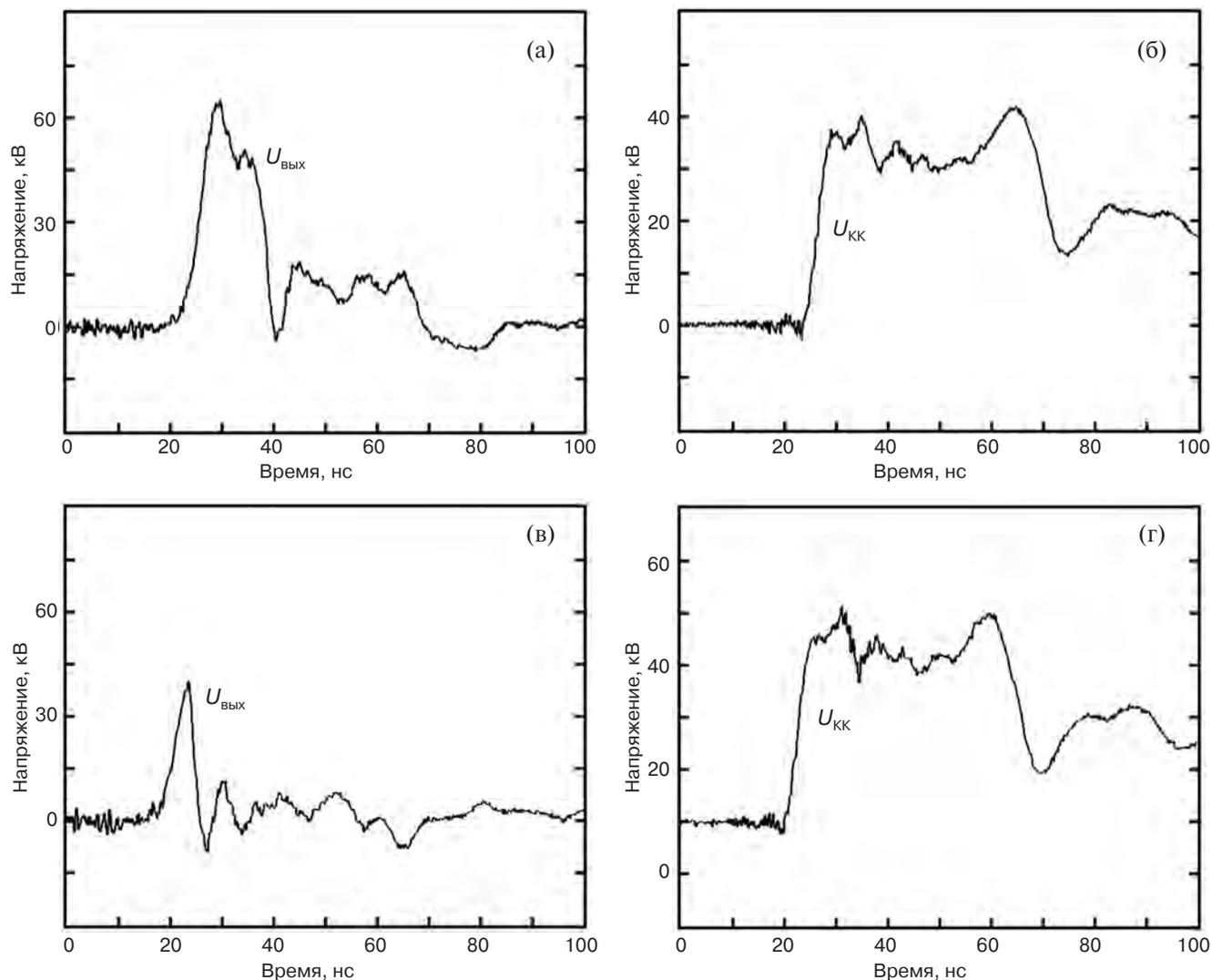


Рис. 4. Осциллограммы импульса выходного напряжения ( $U_{\text{вых}}$ ) и импульса напряжения на входе кабеля ( $U_{\text{кк}}$ ) при подключении кабеля к искровому разряднику.

200 Ом. Сопротивление верхнего плеча делителя составляло 1 кОм.

При подключении КК к резистору 75 Ом был определен джиттер импульсов выходного напряжения. На рис. 5 приведены осциллограммы импульсов  $U_{\text{вых1}}$ ,  $U_{\text{вых2}}$ , которые формировались на конце КК с минимальной и максимальной задержками относительно фронта сигнала управления. Они получены при запуске осциллографа с помощью малогабаритного трансформатора, который фиксировал фронт выходного тока генератора импульсов управления. Из осциллограмм на рис. 5 следует, что в разработанном генераторе разброс моментов генерации выходных импульсов не превышает 2 нс.

На рис. 6 показана фотография основного блока генератора. Он содержит четыре группы накопительных конденсаторов цилиндрической формы, три запускающих конденсатора и четыре блока SID. К блокам SID подключены статические делители напряжения, показанные

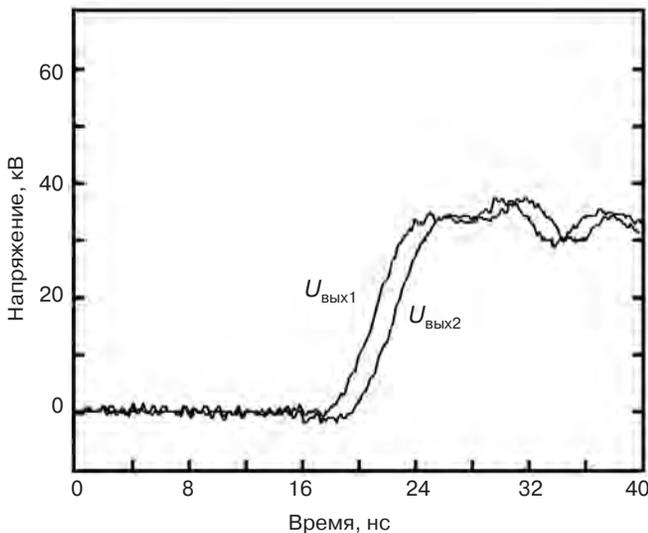


Рис. 5. Осциллограммы импульсов выходного напряжения, соответствующих минимальной и максимальной задержкам включения генератора относительно фронта сигнала управления.

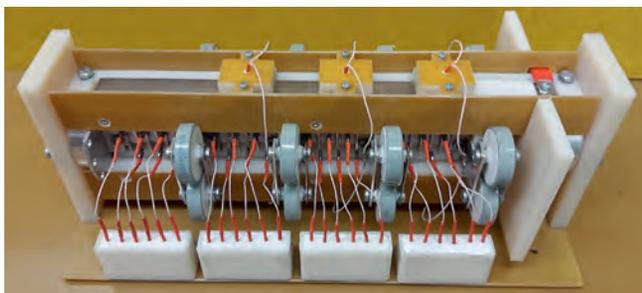


Рис. 6. Внешний вид основного блока генератора.

на переднем плане. Элементы основного блока зажаты в каркасе, который образован боковыми капролоновыми стенками и торцевыми металлическими фланцами. Качественный электрический контакт обеспечивает прижимное устройство. Оно находится в центре одного из фланцев и содержит винт и тарельчатую пружинную шайбу. На внешней стороне боковой стенки расположена заземленная шина, являющаяся обратным токопроводом. На этой шине закреплены корпусы запускающих конденсаторов.

На рис. 7 показан эскизный чертеж фрагмента основного блока: 1 — участок заземленной шины, 2 и 3 — участки боковых стенок, 4 — накопительный конденсатор, 5 — корпус запускающего конденсатора. Блок SID расположен между стенками 2, 3, он содержит пять динисторных структур, которые помещены во фторопластовые корпуса 6 и зажаты между алюминиевыми фланцами 7, 8 с помощью пружины, расположенной внутри фланца 8. Фланцы закреплены на капролоновых пластинах 9. Между корпусами 6 расположены тонкие алюминиевые пластины 10, к которым подключаются резисторы статического делителя. Малая индуктивность коммутационного узла, состоящего из блока SID и накопительных конденсаторов, достигается с помощью бифилярных шин 11, 12. Шина 11 выполнена из алюминия, шина 12 — из медной фольги. Капролоновая вставка 13 исключает прогиб шины 12 при сильном давлении, кото-

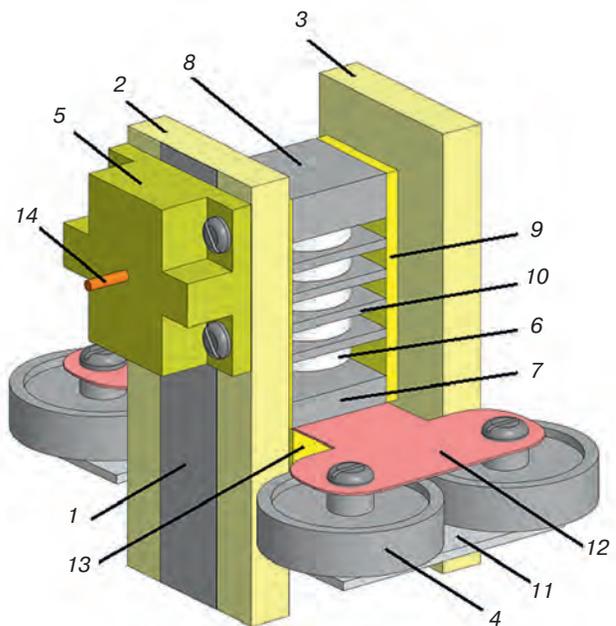


Рис. 7. Эскизный чертеж фрагмента основного блока.

рое создается в основном блоке для обеспечения качественного электрического контакта.

Корпус 5 запускающего конденсатора имеет тонкие стенки, он прижат к шине 1. Потенциальный электрод конденсатора изготовлен из медной фольги, он плотно прилегает к нижней стенке корпуса. Вторым электродом конденсатора является шина 1. Величина емкости запускающего конденсатора определяется площадью его потенциального электрода и толщиной нижней стенки корпуса, которая определяет межэлектродное расстояние и выбирается достаточной для исключения возможности пробоя. Вывод 14 припаян к потенциальному электроду конденсатора, он позволяет соединить этот электрод с блоком SID.

#### 4. ВЫВОДЫ

Результаты проведенных исследований показывают, что разработанный генератор способен формировать выходные импульсы напряжения, имеющие малый джиттер (не более 2 нс), большую амплитуду (38 кВ при работе на нагрузку 75 Ом и 65 кВ при работе на искровой разрядник), малую длительность фронта (менее 5 нс) и сравнительно малую скорость спада (не более 400 В/нс при нагрузке 75 Ом). Благодаря таким коммутационным характеристикам он может быть эффективно использован для развития мощных электроразрядных технологий.

Принцип действия генератора обеспечивает возможность значительно увеличить амплитуду импульсов выходного напряжения путем уве-

личения количества эстафетно включающихся модулей.

Разработанная конструкция генератора позволяет оперативно увеличивать выходную энергию в результате подключения к бифилярным шинам коммутационного узла дополнительных накопительных конденсаторов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рукин С.Н. // ПТЭ. 1999. № 4. С. 5.
2. Grekhov I.V., Efanov V.M., Kardo-Sysoev A.F., Shenderoy S.V. // Solid-State Electron. 1985. V. 28. № 6. P. 597.
3. Efanov V.M., Kardo-Sysoev A.F., Tchashnikov I.G., Yarin P.M. // Proceed. International Power Modulator Symposium, Boca Raton, USA, 1996. P. 22. <https://doi.org/10.1109/MODSYM.1996.564440>
4. Korotkov S.V., Aristov Yu.V., Korotkov D.A., Zhmodikov A.L. // Rev. Sci. Instrum. 2020. V. 91. № 8. P. 084704. <https://doi.org/10.1063/5.0015284>
5. Gusev A.I., Lyubutin S.K., Rukin S.N., Tsyranov S.N. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2016. V. 44. № 10. P. 1888. <https://doi.org/10.1109/TPS.2016.2542343>
6. Коротков С.В., Жмодиков А.Л., Коротков Д.А. // ПТЭ. 2023. № 6. С. 23. <https://doi.org/10.31857/S0032816223060034>
7. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Козлов К.А. // ПТЭ. 2023. № 4. С. 70. <https://doi.org/10.31857/S0032816223040134>
8. Белкин В.С., Шульженко Г.И. Формирователи мощных наносекундных и пикосекундных импульсов на полупроводниковой элементной базе. Препринт 91-51, ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск, 1991.

УДК 537.5

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕДПРОБОЙНЫХ ЯВЛЕНИЙ НА КАТОДЕ ВАКУУМНОГО ПРОМЕЖУТКА

© 2025 г. Е. В. Нефедцев<sup>а</sup> \*, С. А. Онищенко<sup>а</sup>, П. П. Кизириди<sup>а</sup>,  
Е. В. Яковлев<sup>а</sup>, С. Г. Аникеев<sup>б</sup>

<sup>а</sup> *Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3*

<sup>б</sup> *Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 36*

\* e-mail: nev@lve.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 12.11.2024 г.

После доработки 26.12.2024 г.

Принята к публикации 13.01.2025 г.

Предложена и реализована на экспериментальном стенде методика стабилизации предпробойного состояния вакуумных промежутков, основанная на использовании анода, изготовленного из материала с высоким удельным сопротивлением. Выявлены следы предпробойных явлений на поверхности катодов, которые обычно приводят к вакуумной искре и самоуничтожению, и проведено их предварительное исследование. Данная методика позволит в дальнейшем расширить представления о природе вакуумного пробоя и электропластических явлений в критически сильных электрических полях напряженностью свыше 1 МВ/см. Предложено использование предпробойной электростатической тренировки поверхности металлов и полупроводников для изучения возможности получения эффективных холодных эмиттеров электронов.

DOI: 10.31857/S0032816225030084

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что электрическая прочность плоских вакуумных промежутков (ВП) на два порядка ниже величины  $E_0 \sim 30$  МВ/см, соответствующей началу интенсивной автоэлектронной эмиссии с идеальной поверхности катода. Возникновению самостоятельного разряда в ВП предшествует появление сгустков плазмы на катоде – катодных факелов, функционирование и расширение которых поддерживается совокупностью микровзрывов и сопровождается взрывной электронной эмиссией [1]. Наличие перегретой микрозоны, приводящей к первой вакуумной искре, в настоящее время считается обусловленным существованием на поверхности электродов каких-либо геометрических или химических неоднородностей, концентрирующих электрическое поле: случайных микроострий, незакрепленных частиц, открытых пор,

диэлектрических пленок, включений вторых фаз и др. [2, 3]. Однако значительные усилия, затрачиваемые на обеспечение чистоты и совершенства электродов с использованием современных методик, не дают такого эффекта в увеличении электрической прочности ВП, который ожидается на основе теоретических соображений.

В последнее время появляются гипотезы о том, что при напряженности электрического поля в ВП свыше 1 МВ/см поверхность электродов подвергается структурной перестройке [4–8], которая, в свою очередь, приводит к появлению концентраторов электрического поля и центров взрывной эмиссии. Практически неограниченная эмиссионная способность расширяющейся границы катодной плазмы и значительное количество энергии, запасенной в емкости ВП, приводят в дальнейшем к неизбежному росту тока и пробую ВП при любом сколь угодно большом балластном сопро-

тивлении, включенном последовательно в цепь ВП. При этом следы предпробойных явлений на поверхности электродов автоматически уничтожаются эрозией, вызванной вакуумным пробоем. Такие следы удавалось обнаруживать лишь в особых условиях, например на изначально зеркальных стенках резонаторов линейных ускорителей (после эксплуатации и разборки), где напряженности поля свыше 1 МВ/см создаются электромагнитной волной (т. е. без использования ответного электрода) [8].

Для проведения систематических исследований предпробойных явлений, протекающих на поверхности катода под воздействием постоянного электрического поля, необходимо подавление катодной искры, что может быть достигнуто, например, при использовании анода, изготовленного из высокоомного материала [9]. Можно ожидать, что растекание тока по объему и поверхности такого анода приведет к автоматическому снижению локальной разности потенциалов между точками входа и выхода формирующегося разрядного канала и подавлению сильноточного разряда. Реализация данной идеи требует особых конструктивных решений при создании экспериментальной установки, в которой минимизированы утечки заряда, конструктивные емкости и шумовые составляющие полезных сигналов.

Задачами работы являлось получение электрофизических характеристик ВП с высокоомным анодом в различных тестовых режимах электростатической тренировки, а также поиск и изучение следов предпробойных явлений на катоде, соответствующих этим режимам. В комплекс исследований были включены также регистрация импульсов тока и акустических волн, вызванных разрядами. Рассмотрена возможность использования электростатической тренировки поверхности металлов в практических целях.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

Экспериментальный стенд был рассчитан на проведение электростатической тренировки поверхности катода миллиметровых или субмиллиметровых ВП при ограничении тока на уровне 100 нА. Он состоял из трех последовательно соединенных герметичных цилиндрических камер (рис. 1). Электрическая связь осуществлялась через проходные изоляторы из полиэтилена, капролона и керамики.

В нижней камере на диэлектрической стойке располагался источник постоянного напряжения 1, изготовленный на основе двух последовательно соединенных 20-каскадных умножителей и преобразователя. Диапазон напряжения 7–24 В, подаваемого от внешнего стабилизированного источника питания 2 на преобразователь, соответствовал диапазону напряжения источника 25–60 кВ. Основной постоянной нагрузкой источника питания служил делитель напряжения 3, собранный на основе шести последовательно соединенных резисторов типа КЭВ-5 сопротивлением 360 МОм каждый, которые располагались на остальных двух диэлектрических стойках. Нижнее плечо делителя сопротивлением 275 кОм обеспечивало коэффициент деления 1:10 000 (с учетом входного сопротивления осциллографа 1 МОм). В средней камере располагался балластный резистор 4 общей длиной 60 см. Для обеспечения равномерной электростатической нагрузки материалы

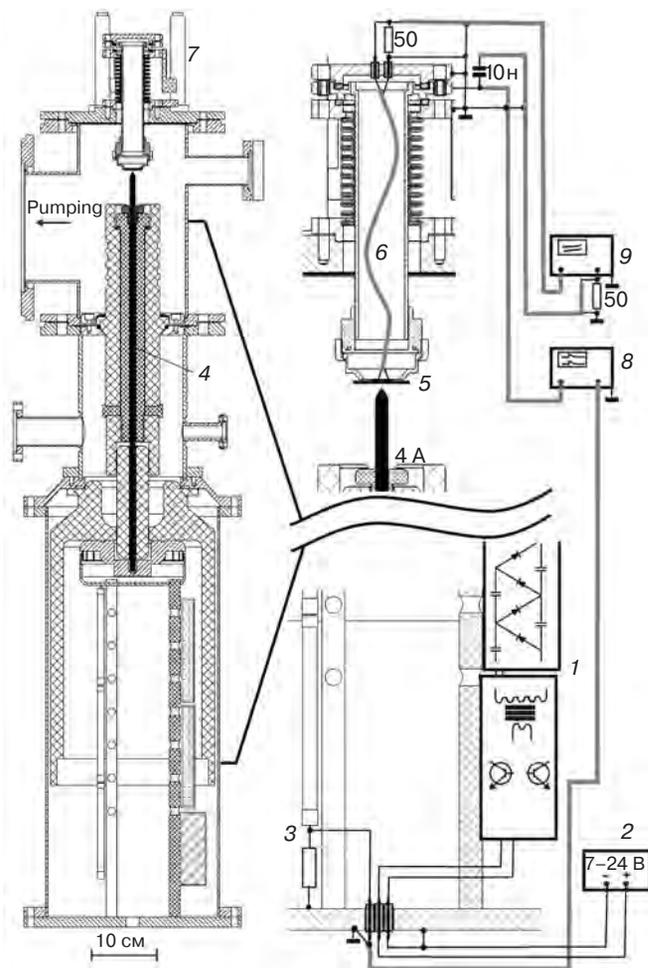


Рис. 1. Эскиз экспериментального стенда.

резистора и анода должны обладать близкими значениями удельного сопротивления. Было принято решение объединить функции резистора и анода в одном материале, используя для этой цели набор из пяти ферритовых стержней марки 100НН с удельным сопротивлением порядка  $10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , диаметром 8 мм, длиной 140 мм. Верхний стержень 4А совмещал функции вакуумного уплотнителя (вместе с винтом и обжимным силиконовым кольцом), окончания балластного резистора (часть ниже уплотнения) и анода (часть выше уплотнения). Остальные стержни резистора располагались свободно в канале диаметром 10 мм составного изолятора, в который проникал элегаз из окружающего объема. Электрический контакт между стержнями осуществлялся через шарики из скотканной алюминиевой фольги. Уплотнение шариков осуществлялось в процессе обжима верхнего стержня силиконовым кольцом. Перед монтажом балластного резистора проводился отбор стержней по величине электрического сопротивления, которое в пределах одной партии поставки имело значительный разброс (около 50%). Точное значение суммарного сопротивления резистора 0.53 ГОм измерено непосредственно в ходе экспериментов (см. далее). Конец анода был отшлифован на конус с округленной вершинкой диаметром 1 мм, отполирован и промыт в изопропанол в ультразвуковой ванне. Нижняя и средняя камеры после предварительной откачки заполнялись элегазом при 1 атм для подавления коронных и поверхностных разрядов.

Верхняя, экспериментальная, вакуумная камера откачивалась турбомолекулярным насосом до уровня остаточного давления не более  $8 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$ . Для вертикального перемещения трубчатого штока 6 с закрепленным на нем образцом (катодом) 5 использовалось его соединение с крышкой вакуумной камеры через сильфон, растягиваемый тремя микрометрическими винтами 7, расположенными под углами  $120^\circ$  друг к другу. Такая конструкция позволяла регулировать межэлектродное расстояние с точностью до 5 мкм, а также создавать небольшие угловые отклонения стержня относительно вертикали для малых горизонтальных перемещений поверхности катода относительно анода. Межэлектродное расстояние контролировалось также при помощи длиннофокусного микроскопа через окно вакуумной камеры.

Измерение напряжения и тока в цепи ВП осуществлялось осциллографом TDS-2014B 8 в режиме медленных разверток 10–50 с/дел. На первый канал осциллографа подавалось напряжение с делителя 1:10 000. Вход второго канала подключался в разрыв катодной цепи между изолированным фланцем с образцом и корпусом камеры (входное сопротивление осциллографа 1 МОм служило измерительным сопротивлением). При плотном смыкании электродов и ступенчатой подаче напряжения 50 кВ (рис. 2) получены следующие данные:

- 1) уточнено значение сопротивления балластного резистора – 0.53 ГОм;
- 2) оценена инерционность отклика сигнала тока – порядка 10 с, связанная с зарядкой кабеля осциллографа и поляризационными явлениями в изоляторах и самом резисторе;
- 3) исследованы характерные фоновые шумы сигнала тока и устойчивость резистора к пробое. При длительных выдержках под напряжением 50–60 кВ не было зафиксировано ни одного значительного скачка тока, который бы мог свидетельствовать о пробое резистора по объему или по поверхности.

При наличии зазора между электродами иногда возникали разряды. Импульсы разрядов регистрировались в ждущем режиме отдельным осциллографом ADS-2121MV 9 (рис. 1). Постоянная составляющая тока отфильтровывалась конденсатором емкостью 0.01 мкФ, включенным последовательно к внутреннему проводнику коаксиального кабеля. Для исследования акустического отклика разряда на второй канал осциллографа подавался сигнал, снимаемый с пьезоэлемента, закрепленного на образце.

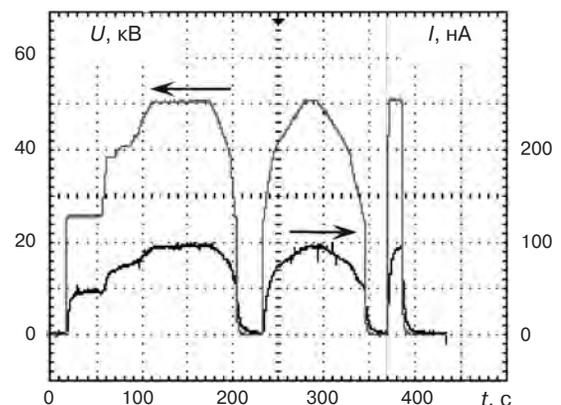


Рис. 2. Характеристики балластного резистора-анода при ступенчатом изменении напряжения.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОБРАЗЦЫ

Обнаружение мелких и малоконтрастных следов предпробойных явлений после электростатической тренировки ВП оказалось возможным лишь при использовании катодов с зеркально гладкими поверхностями. В качестве тестовых в настоящей работе выбраны два существенно различающихся по свойствам материала: медь (мягкий и пластичный металл) и кремний, легированный сурьмой (твердый и хрупкий полупроводник  $n$ -типа) с удельным сопротивлением порядка  $10^{-4}$  Ом·м (ЭКЭС-0,01-БК). Оба материала имели монокристаллическую структуру с ориентацией рабочей поверхности (111).

Пластинки меди имели размер  $10 \times 10 \times 3$  мм<sup>3</sup>. Перед испытанием проводилась механическая, а затем электролитическая полировка рабочей поверхности на глубину не менее 50 мкм в ортофосфорной кислоте, насыщенной ионами меди, под напряжением 0.9 В. В ходе испытаний пластинки фиксировали в специальной струбцине.

Пластинки кремния размером приблизительно  $30 \times 30$  мм<sup>2</sup> выкалывались из пластины толщиной 0.8 мм диаметром 100 мм с исходно полированной в заводских условиях поверхностью. Образцы погружались на 20 с в 0.5-процентный водный раствор плавиковой кислоты для снятия поверхностного окисла, после чего на тыльной (не полированной) стороне пластины формировался омический контакт последовательным нанесением In–Ga-эвтектики и слоя клея “Контактол” с серебряным наполнителем. При проведении электроакустических исследований на центральную часть пластинки с тыльной стороны (с уже готовым, тщательно просушенным контактом) дополнительно наклеивался пьезоэлемент. Толщина клея (использовался клей “Момент”) обеспечивала надежную электрическую изоляцию пьезоэлемента. Готовый образец тыльной стороной приклеивался “Контактолом” на оправку, изготовленную из стали 12Х18Н10Т, по круговому периметру диаметром 26 мм (рис. 1). Сигнал от пьезоэлемента передавался по коаксиальному кабелю марки РК50-0.6-21, размещенному в трубчатом штоке манипулятора.

Перед испытаниями с помощью оптического микроскопа проводилось картографирование той части поверхности образцов, напротив которой предполагалось расположить анод. После испытаний выявлялись особенности тренированной электрическим полем поверхности по отношению к исходной. Повторное карто-

графирование позволяло также фиксировать координаты новых локальных образований для их дальнейшего исследования в растровом электронном микроскопе.

### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### 4.1. Статические характеристики

Начальные условия эксперимента соответствовали минимальному напряжению источника  $U = 25$  кВ и расстоянию между электродами  $d = 1000$  мкм. При сокращении  $d$  или увеличении  $U$  наблюдалась ступень “включения” проводимости ВП, после чего возникал флуктуирующий ток  $I$  порядка единиц наноампер. Флуктуации превышали шумовые флуктуации, регистрируемые при плотном смыкании анода с катодом, что свидетельствовало о том, что они связаны с физическими процессами, протекающими на поверхности электродов ВП. Дальнейшим сокращением  $d$  или увеличением  $U$  можно было регулировать ток в пределах величины тока короткого замыкания порядка 100 нА. Приблизительно однозначные характеристики  $I(U)$  или  $I(d)$  можно было получить в ходе многократного циклирования по  $U$  или  $d$  в ограниченных пределах. Выход за пределы цикла в сторону уменьшения  $d$  или увеличения  $U$  приводил к необратимому смещению характеристик в сторону более высоких значений тока. Иными словами, характеристики  $I(U)$  или  $I(d)$  зависели от того значения максимального тока, который достигался (хотя бы единожды) в ВП. После цикла тренировок ВП в электрическом поле и выдержки электродов в камере, заполненной воздухом, электрофизические характеристики ВП соответствовали финишным, зарегистрированным перед паузой. Таким образом, состояние проводимости ВП при данных условиях тренировки в меньшей степени связано с процессами физической адсорбции или десорбции газов на поверхности катода, а в большей степени с необратимыми процессами в приповерхностном материале катода.

Отличия характеристик ВП с полупроводниковым и металлическим катодами в основном связаны с характерными временами релаксационных переходов от одного значения тока к другому при изменении  $d$  и  $U$ : порядка 10 с для ВП с медным катодом и порядка 100 с для ВП с полупроводниковым катодом (рис. 3).

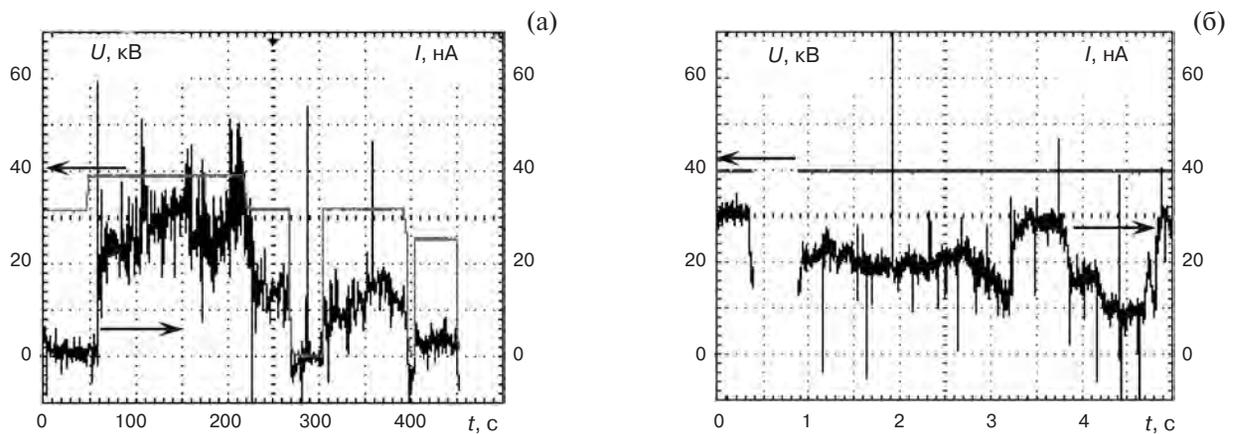


Рис. 3. Характер флуктуаций и релаксаций сигнала тока при ступенчатых изменениях напряжения: а – развертка 50 нс/дел; б – развертка 0.5 нс/дел. Катод – легированный кремний. Зазор между электродами 500 мкм.

#### 4.2. Разряды

В ходе измерений характеристик  $I(t)$  и  $U(t)$  в цепи ВП обнаружены скачки тока амплитудой примерно 0.1–0.3 А длительностью около 100 нс (разряды). Количество разрядов в полном цикле измерений, как правило, не превышало десяти. Часто после серии, состоящей из 2–3 разрядов, они прекращались и могли повториться вновь при дальнейшем увеличении напряженности поля. Разряды, как правило, не влияли на ход и зашумленность характеристики  $I(t)$ . Лишь в редких случаях непосредственно после разряда наблюдалось ступенчатое увеличение или уменьшение величины тока. Для исследования формы волны тока, протекающего во время разряда, в общую схему была введена измерительная цепь с отдельным осциллографом, работающим в ждущем режиме на короткой развертке (рис. 1). Импульс разряда уширялся с увеличением межэлектродного расстояния. В случае

полупроводникового катода при  $d > 200$  мкм импульс принимал сложную форму с наложением нескольких максимумов. Использование образцов с закрепленными на них пьезоэлементами показало корреляционную связь между осциллограммой тока разряда и осциллограммой звуковой волны (рис. 4). Следует отметить, что амплитуда тока разрядов по порядку величины соответствовала нижнему пределу тока взрывной электронной эмиссии, установленной экспериментально [1].

#### 4.3. Поверхность катода

После электростатической тренировки медных и кремниевых катодов (независимо от возникновения или отсутствия разрядов в ходе тренировки) на той части их поверхности, которая находилась напротив анода, обнаружены мало-контрастные пятна. На рис. 5а, 5б представлено изображение пятен после использования допол-

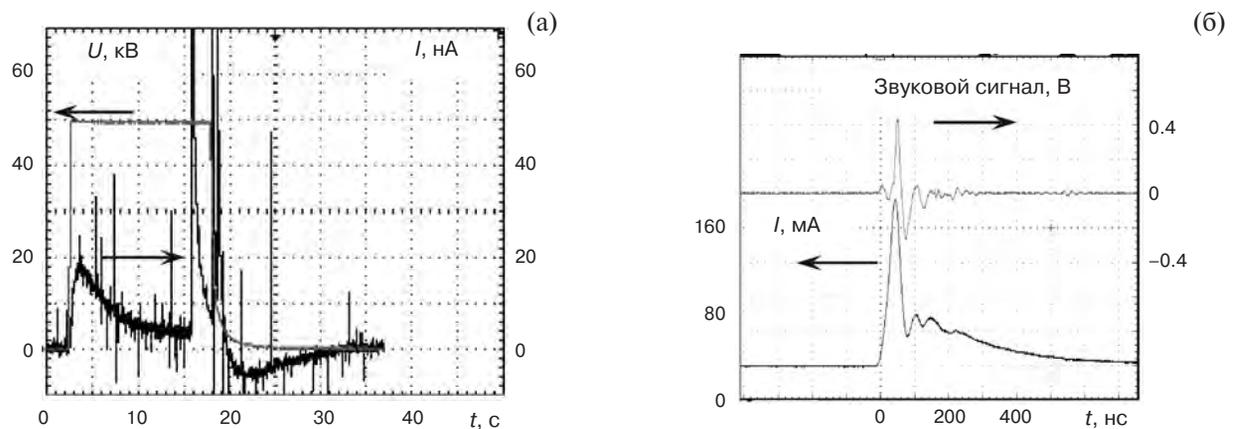
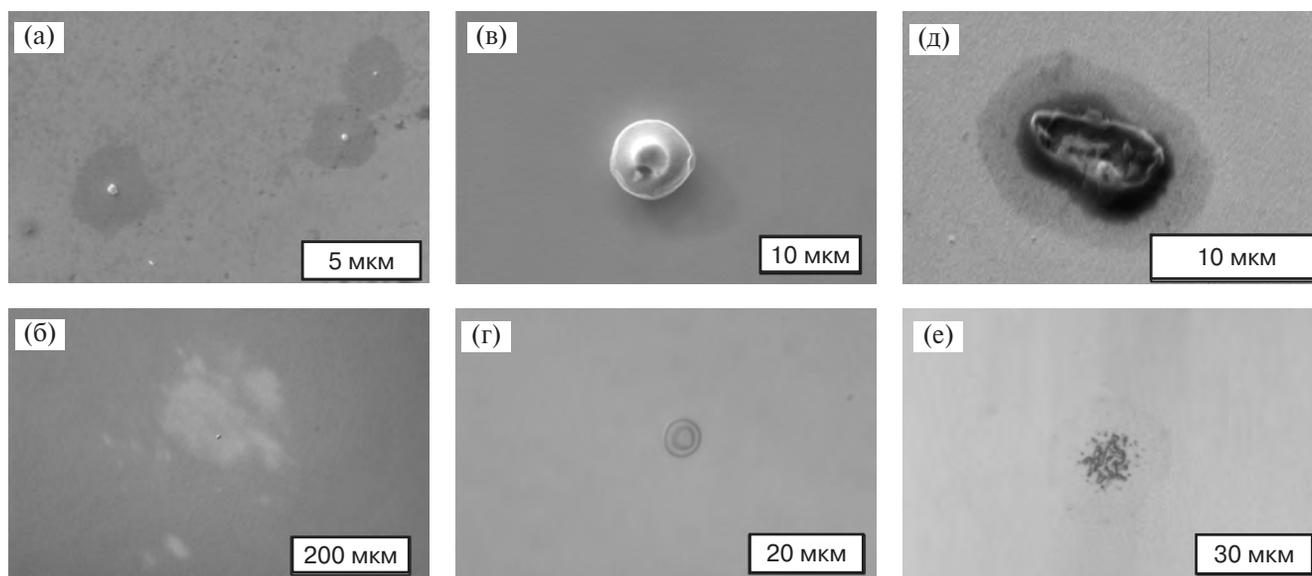


Рис. 4. Скачки тока во время разрядов: а – осциллограмма с длительной разверткой, совмещенная с осциллограммой напряжения; б – осциллограмма с быстрой разверткой, совмещенная с осциллограммой звукового сигнала. Зазор между электродами 350 мкм.



**Рис. 5.** Образования, появившиеся после электростатической тренировки поверхности медных (а, в, д) и кремниевых (б, г, е) катодов: а, б – пятна; в, г – предразрядные локальные образования; д, е – образования, возникшие после разрядов.

нительного цифрового контрастирования. В центральных областях некоторых пятен выявлены локальные образования с гладким рельефом и ровной окантовкой (рис. 5в, г). После электростатических тренировок, сопровождаемых разрядами, обнаружены образования с развитым рельефом и неровной окантовкой (рис. 5д, е), причем их количество соответствовало количеству разрядов. Следует заметить, что на микрофотографиях поверхности катода, сделанных до электрической тренировки, участки, соответствующие всем перечисленным образованиям, выглядели ровными и оптически однородными.

Энергодисперсионный микроанализ не выявил содержания каких-либо сторонних элементов в составе пятен и локальных образований, возникших на поверхности кремниевых катодов {100 ат. % Si}. Для медных же катодов получены противоречивые результаты. Элементный состав новых образований находился в диапазоне от {100 ат. % Cu} до {70 ат. % Cu + 30 ат. % C}. Выяснение причин появления углерода на поверхности меди после выдержки в электрическом поле требует отдельных исследований.

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ ТЕСТОВЫХ ИСПЫТАНИЙ И ПЕРСПЕКТИВ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Апробация функционирования экспериментального стенда и связанной с ним методики исследования характеристик ВП показала воз-

можность получения новых фундаментальных знаний о механических и электрофизических свойствах поверхности твердых проводящих сред, погруженных в сильное электрическое поле. Результаты работы прежде всего указывают на то, что теоретический предел электрической прочности вакуумного промежутка  $E_0$ , отвечающий ровной поверхности электродов, недостижим хотя бы в силу того, что уже при напряженности электрического поля порядка  $E_0/10$  возникают изменения свойств приповерхностного слоя, которые, в свою очередь, приводят к локальным геометрическим нарушениям поверхности. На основе лишь электрических измерений и микроскопических исследований, представленных в нашей работе, сложно дать заключение о том, происходят ли такие изменения в твердой фазе (согласно, например, гипотетическим механизмам [6, 7]), или в результате появления фрагментов жидкой пленки (согласно, например, гипотезе и оценкам авторов [8]).

С учетом возможности стабилизации и контроля предпробойных условий в ВП представленная в настоящей работе методика может быть дополнена лазерно-оптической диагностикой состояния катодной поверхности *in situ*. Для применения методов структурного анализа поверхности катода в дальнейшем целесообразна электростатическая тренировка широких областей электрода с использованием плоского анода.

Представленную методику удержания контролируемого предпробойного состояния ВП с высокоомным анодом предполагается распространить в область практических технологий. Следует заметить, что, в отличие от технологии вакуумной электронно-пучковой обработки, где мишенью является анод, на котором выделяется основная тепловая мощность, в данном случае предполагается модификация поверхности материала образца-катода электрическим полем, где плотность тока является количественным показателем уровня такой модификации. При этом, как следует из представленных результатов, металл или полупроводник с модифицированной поверхностью автоматически приобретает и сохраняет свойства эффективного холодного эмиттера электронов, что может быть использовано на практике, в том числе в упоминаемой выше технологии вакуумной электронно-пучковой обработки. Исходя из простых оценок, при использовании достаточно мощного источника питания и балластного резистора — анода с удельным сопротивлением порядка  $10^4$  Ом·м эмиссионный ток можно контролируемо поднимать вплоть до 1 мА. Ферриты различных марок как термически стойкие и механически прочные материалы с широким спектром высоких значений удельного сопротивления могут оказаться наиболее подходящими материалами для изготовления анодов при реализации такого рода поверхностной формовки эмиттеров.

## 6. ВЫВОДЫ

1. Изготовлен экспериментальный стенд, позволяющий исследовать воздействие сильного электрического поля на металлические и полупроводниковые материалы через вакуумный промежуток без риска значительного разрушения поверхности пробоем.

2. На основе представленной экспериментальной методики получены предварительные данные, свидетельствующие о том, что в электрическом поле напряженностью свыше 1 МВ/см на поверхности монокристаллических катодов вакуумного промежутка возникают плоские структурно-модифицированные участки и объемные микроскопические объекты, не несущие признаков взрывообразных процессов. Механизмы образования этих объектов и их последующей трансформации во взрывоэмиссионные центры будут освещены в отдельных

публикациях на основе дополнительных исследований.

3. Экспериментальные работы, основанные на изложенной методике, могут представлять интерес для специалистов, работающих в различных областях физики, в частности занимающихся проблемами инициирования и подавления вакуумного пробоя (электрофизика), изучением природы электропластических явлений при критически высоких напряженностях электрического поля (физика твердого тела), а также поиском новых методов модификации поверхности материалов, в том числе с целью получения эффективных холодных электронных эмиттеров большой площади (эмиссионная электроника).

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Д.И. Проскуровскому и А.В. Батракову за обсуждение результатов работы. Исследования поверхности экспериментальных образцов выполнены на оборудовании Томского регионального центра коллективного пользования Национального исследовательского Томского государственного университета.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-29-00481).

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Месяц Г.А., Проскуровский Д.И.* Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984.
2. *Латам Р.* Вакуумная изоляция установок высокого напряжения. Москва: Энергоатомиздат, 1985.
3. *Сливков И.Н.* Процессы при высоком напряжении в вакууме. Москва: Энергоатомиздат, 1986.
4. *Nordlund K., Djurabekova F.* // *Phys. Rev. Accel. Beams.* 2012. V. 15. P. 071002. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.15.071002>
5. *Engelberg E.Z., Ashkenazy Y., Assaf M.* // *Phys. Rev. Lett.* 2018. V. 120. P. 124801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.124801>

6. *Engelberg E.Z., Yashar A.B., Ashkenazy Y., Assaf M. Popov I.* // *Phys. Rev. Accel. Beams.* 2019. V. 22. № 6. P. 083501.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.22.083501>
7. *Djurabekova F., Kimari Y., Saressalo A.* // *Proc. 30th ISDEIV, Okinawa, Japan, 2023.* P. 5.  
<https://doi.org/10.23919/ISDEIV55268.2023.10200159>
8. *Antoine C.Z., Peauger F., Le Pimpec F.* // *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A.* 2011. V. 665. P. 54.  
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.11.032>
9. *Nefedtsev E.V., Onischenko S.A.* // *Proc. 29th ISDEIV. Padova, Italy, 2021.* P. 23.  
<https://doi.org/10.1109/ISDEIV46977.2021.9586987>

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ  
ТЕХНИКА

УДК 621.3.038.624

ИМПУЛЬСНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ СПРУТ ДЛЯ ЗАДАЧ  
РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ© 2025 г. Н. М. Вагина<sup>а</sup>\*, В. Б. Бычков<sup>а</sup>, С. А. Андреев<sup>а</sup>, В. П. Шукайло<sup>а</sup>, А. Е. Лыжин<sup>а</sup>,  
Е. Н. Колосков<sup>а</sup>, А. И. Негреев<sup>а</sup>, Д. Д. Черноскулова<sup>а</sup>, Е. Н. Ежов<sup>а</sup>, А. В. Кузьмин<sup>а</sup><sup>а</sup> Российский федеральный ядерный центрВсероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. акад. Е.И. Забабахина  
Россия, 456770, Снежинск, Челябинская обл., ул. Васильева, 13

\* e-mail: dep5@vniitf.ru

Поступила в редакцию 11.11.2024 г.

После доработки 09.01.2025 г.

Принята к публикации 17.01.2025 г.

Определение порогов массового сбоя в электронных приборах по плотности потока воздействующих частиц является актуальной проблемой разработки радиационно-стойкой аппаратуры. Для решения задач такого класса создан специальный трехлучевой импульсный ускоритель электронов СПРУТ, обеспечивающий генерацию пучка электронов энергией 5–7 МэВ с током около 1 А, длительностью импульса 1–12 мкс и частотой следования до 1 Гц. За выходной фольгой формируется суммарный электронный пучок диаметром не менее 20 мм с высокой плотностью потока электронов. Конфигурацию и положение суммируемых пучков можно менять, обеспечивая поле облучения с неравномерностью не хуже 30%. Настоящая статья посвящена описанию устройства и принципа действия ускорителя СПРУТ, методов и результатов измерений его характеристик, а также изучению возможностей по формированию поля облучения.

DOI: 10.31857/S0032816225030091

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Радиационная стойкость электронной компонентной базы в части одиночных и дозовых радиационных эффектов является одной из проблем, ограничивающих срок полезного использования бортовой радиоэлектронной аппаратуры (приборов, узлов и блоков) космических аппаратов. Фактором воздействия является излучение космического пространства. При проведении испытаний на стойкость электронной компонентной базы к воздействию электронного и протонного излучений космического пространства в части дозовых эффектов используются ускорители электронов. Одним из этапов исследований радиационной стойкости элементов электроники является определение порогов массового сбоя по плотности потока воздействующих частиц. Для решения этой задачи был создан ускоритель электронов СПРУТ, работающий в режиме одиночных или периодических

импульсов со следующими проектными характеристиками (табл. 1):

**Таблица 1.** Проектные характеристики ускорителя электронов СПРУТ

Частота следования импульсов, Гц	1
Ток пучка электронов в импульсе излучения, А	~1
Энергия электронов пучка, МэВ	5–7
Диапазон регулирования длительности импульса, мм	1–12

Установка СПРУТ (специальный резонансный ускоритель) – это импульсный линейный резонансный ускоритель электронов разработки АО “НИИЭФА им. Д.В. Ефремова”, Санкт-Петербург, главной конструктивной особенностью которого является наличие трех синхронно работающих ускоряющих структур, генерирующих три пучка электронов, сходящихся за выходной фольгой на расстоянии 40 мм, которые форми-

руют поля облучения разной площади с разной степенью равномерности.

Такая трехлучевая компоновка, с одной стороны, обеспечивает требуемую плотность потока электронов в импульсе; с другой стороны, способна сформировать более равномерное поле облучения по сравнению с однолучевой за счет суперпозиции электронных пучков, управляемых элементами магнитной оптики. Устройство и принцип действия ускоряющих структур ускорителя СПРУТ заимствованы у более ранних разработок ускорителей для радиационной стерилизации [1, 2].

Формирование поля облучения с необходимыми характеристиками для проведения исследований радиационной стойкости является основной задачей этапа настройки работы ускорителя. Требования к полю облучения таковы: площадь пятна пучка электронов до  $150 \text{ см}^2$  с неравномерностью по плотности потока электронов не более 30%. При этом необходимо обеспечить максимальный ток пучка с регулируемой энергией электронов 5–7 МэВ и длительность импульса в диапазоне от 1 до 12 мм с шагом 1 мм.

Настоящая статья посвящена описанию устройства и принципа действия ускорителя СПРУТ, методов и результатов измерений его характеристик, а также изучению возможностей по формированию поля облучения.

## 2. КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП РАБОТЫ УСКОРИТЕЛЯ СПРУТ

Внешний вид ускорителя электронов модели УЭЛР-7-1А – СПРУТ представлен на рис. 1. Основными узлами ускорителя являются моду-

ляторы клистронов, три канала ускорения и выходная вакуумная камера для вывода пучка и установки облучаемых образцов.

На рис. 2 представлена конструкция одного канала ускорения. Каждый канал состоит из источника электронов, канала ввода СВЧ-мощности от модуляторов клистронов, ускоряющей структуры и тракта транспортировки пучка, оснащенного тремя корректирующими магнитами и фокусирующей квадрупольной линзой. Вывод пучков осуществляется через выходную титановую фольгу в выходную вакуумную камеру. Каналы размещены на подставке и оснащены магниторазрядными насосами. Источником электронов в излучателе служит термоэмиссионный катод.

Принцип действия ускорителя СПРУТ состоит в следующем. В излучателе трехэлектродный источник электронов, импульсное питание которого осуществляется от катодного и сеточного модуляторов, формирует электронный пучок. В качестве эмиттера электронов используется оксидно-никелевый катод с косвенным подогревом. Далее пучок электронов инжектируется в бипериодическую ускоряющую структуру на основе цепочки связанных резонаторов, в конце которой он приобретает максимальную энергию, равную 5, 6, 7 МэВ. По такому принципу синхронно работают все три канала ускорителя. По расчетам диаметр пучка электронов на выходе из ускоряющей структуры составляет 2.7 мм. Одним из способов формирования поля облучения большей площади и равномерности является расфокусировка пучка с помощью рассеивающей алюминиевой

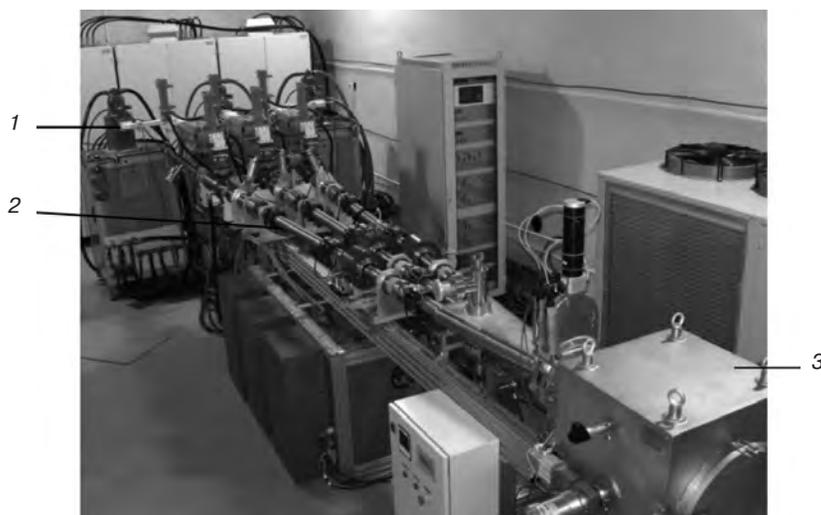
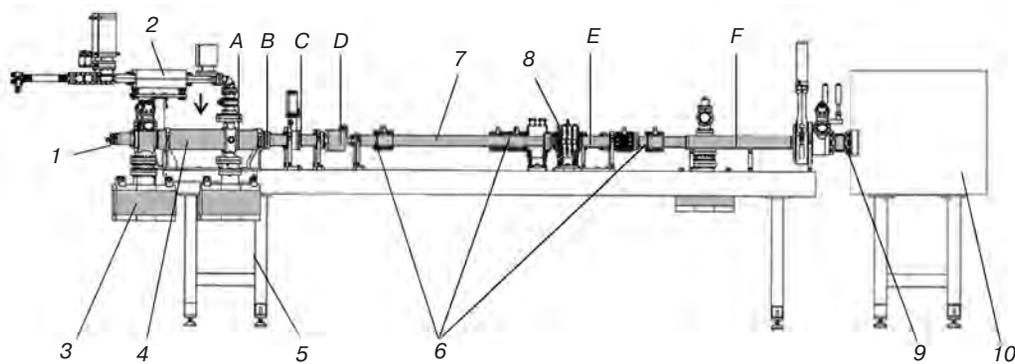


Рис. 1. Внешний вид ускорителя СПРУТ: 1 – модулятор клистрона, 2 – канал ускорения, 3 – выходная вакуумная камера.



**Рис. 2.** Компоненка одного тракта ускорения (вид сбоку): 1 – источник электронов, 2 – канал ввода СВЧ-мощности, 3 – магнетронный насос, 4 – ускоряющая структура, 5 – подставка, 6 – корректирующие магниты, 7 – тракт транспортировки, 8 – фокусирующая линза, 9 – выходная фольга, 10 – выходная вакуумная камера, А–F – плоскости дозиметрии.

фольги, размещенной за ускоряющей структурой. По оценкам в этом случае диаметр пучка увеличится примерно до 20 мм.

Каждый тракт транспортировки пучка имеет собственную магнитную оптику – три корректирующих магнита и фокусирующую линзу для формирования необходимого поперечного сечения пучка, корректировки его положения в пространстве и достижения заданной площади облучения.

Поскольку всякая ускоряющая резонансная структура очень чувствительна к изменению температуры ее элементов, для получения стабильных режимов генерации пучка требуется ее предварительный прогрев. Для ускорителя СПРУТ это время составляет примерно 30 мин.

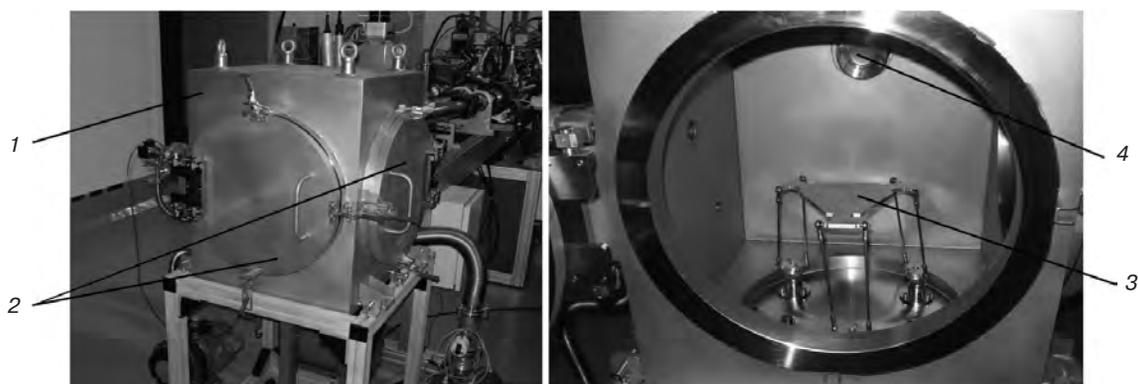
Внешний вид и устройство выходной вакуумной камеры показаны на рис. 3. Корпус камеры оснащен двумя герметично закрывающимися окнами загрузки и площадкой для размещения объектов испытаний. Три пучка электронов проходят через выходную фольгу и формируют поле

облучения внутри объема выходной камеры. Система электроприводов площадки для размещения объектов испытаний позволяет позиционировать объект в пределах  $\pm 200$  мм (влево-вправо и вперед-назад) относительно центра выходной фольги, а также проводить “сканирование пучком” объектов большой площади.

Рабочее давление остаточных газов в трактах ускорителя равно  $10^{-5}$  Па, в вакуумной камере –  $10^{-1}$  Па.

### 3. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

При настройке работы линейных ускорителей электронов существуют трудности в оперативной диагностике положения пучка электронов вдоль тракта транспортировки и оценке его поперечных размеров на разных участках протяженных трактов. Удержание и фокусировка пучка вдоль тракта осуществляются с помощью фокусирующих линз и корректирующих маг-



**Рис. 3.** Внешний вид и конструкция выходной вакуумной камеры: 1 – корпус камеры, 2 – окна загрузки, 3 – площадка для размещения объектов испытаний, 4 – выходная фольга.

нитов, настройка работы которых часто происходит “наощупь”, так как контроль наличия и размеров пучка осуществляется за выходной фольгой. Поэтому при настройке тракта важно определить критические точки (узлы конструкции), на которых могут формироваться потери электронов пучка, заметно снижающие ток ускорителя.

На ускорителе СПРУТ опробован способ оценки величины потерь пучка с помощью измерения экспозиционной дозы тормозного излучения, возникающего при диссипации пучка электронов на элементах тракта транспортировки. Такой способ не требует разгерметизации тракта, он позволяет оперативно оценить степень влияния каждого узла на распределение потерь пучка, связанное с распределением дозы тормозного излучения по длине тракта. Для этого на элементы трактов снаружи устанавливали термолюминесцентные детекторы, образуя шесть контрольных плоскостей  $A-F$  (см. рис. 2).

Диапазон измерений экспозиционной дозы гамма-излучения составляет от 1 до  $2.2 \cdot 10^5 P$  [3, 4]. Относительная погрешность измерений в указанном диапазоне не превышает 20%. Измерения проводили как для каждого тракта в отдельности, так и при их совместной работе. Для накопления значимых значений дозы на детекторах проводились серии одиночных импульсов длительностью 12 мм. В табл. 2 представлены усредненные по трем детекторам значения экспозиционной дозы в контрольных плоскостях  $A-F$ . Генерация пучка электронов в каждом тракте по отдельности показала, что вклад тормозного излучения от соседних каналов в показания детекторов практически отсутствует, и им можно пренебречь.

Наибольшие значения дозы (и, соответственно, потерь пучка) наблюдаются на кон-

трольной плоскости  $C$ , в зоне рассеивающей фольги; с одной стороны, это ожидаемо, с другой стороны, это дало повод определить сравнительные характеристики поля облучения с установленной рассеивающей фольгой и без нее. Распределение доз по длине тракта без рассеивающих фольг более равномерно и снижается до уровня 1–2  $P$ .

Измерение тока пучка электронов проводилось методом полного поглощения на коллекторной пластине, установленной за выходной фольгой ускорителя и электрически изолированной от корпуса ускорителя. Схема измерений полного тока электронного излучения представлена на рис. 4. Ток электронов определяется по падению напряжения на нагрузочном сопротивлении 50 Ом, которое регистрируется цифровым осциллографом TEKTRONIX TDS 2014. Относительная погрешность полученных результатов измерений не превышает 5%.

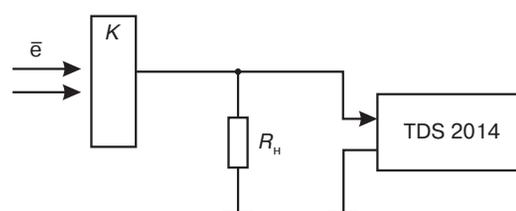


Рис. 4. Схема измерений полного тока электронного излучения:  $K$  – коллекторная пластина,  $R_n = 50$  Ом – сопротивление нагрузки.

На рис. 5 приведены типичные осциллограммы импульсов напряжения, снимаемых с коллекторной пластины при одновременной работе трех каналов ускорителя для длительностей импульсов 1 и 12 мм. При максимальной длительности форма импульса наиболее близка к прямоугольной. Максимальное значение тока чуть больше 1.3 А достигается при отсутствии рассеивающей фольги и при наибольшей дли-

Таблица 2. Распределение экспозиционной дозы вдоль трактов

Контрольная плоскость	Среднее значение экспозиционной дозы, $P$		
	Тракт 1	Тракт 2	Тракт 3
$A$	1	2	1
$B$	26	41	26
$C$	164	262	139
$D$	3	5	3
$E$	7	5	6
$F$	3	3	3
Среднее значение дозы вдоль тракта без учета плоскости $C$	8	11	8

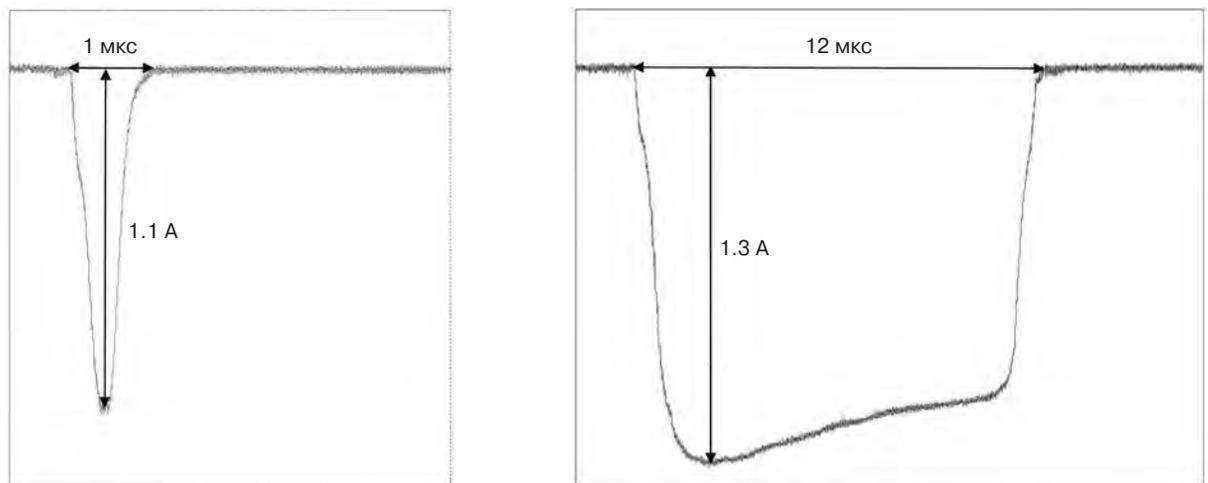


Рис. 5. Типичные осциллограммы импульсов напряжения при работе трех каналов ускорителя и длительности импульса 1 и 12 мкс.

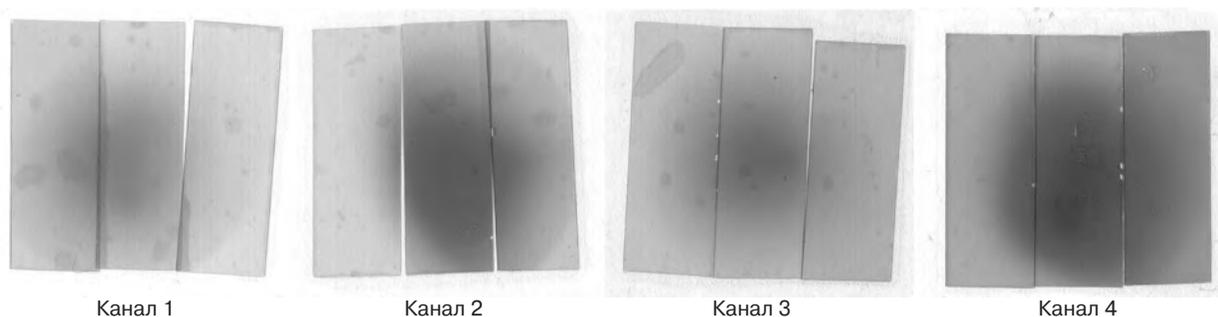


Рис. 6. Сканированные изображения дозиметрических пленок после облучения.

тельности импульса. В экспериментах с установленной рассеивающей фольгой ток снижается на 18% и составляет 1.1 А. В режиме короткого импульса (1–2 мм) ускоритель не успевает выйти на оптимальный режим и величина тока становится ниже относительно максимального значения на 15%.

Для исследования неравномерности электронного излучения по сечению использовались дозиметрические пленки СО ПД(Ф)Р-5/50, которые являются рекомендованным материалом для измерения дозы фотонного и электронного излучений. Пленки набором из 3 штук устанавливались за выходным окном на расстоянии 10 мм, они перекрывали площадь 900 мм<sup>2</sup>. Степень покраснения пленки пропорциональна плотности потока электронов. Расчеты показали, что вклад тормозного излучения в общий эффект на пленке пренебрежимо мал — он не превышал 0.01%. На рис. 6 представлены сканированные изображения дозиметрических пленок для первого, второго и третьего каналов по отдельности и трех каналов, работавших одно-

временно. В сериях одиночных пусков ускорителя количество импульсов длительностью 12 мкс составляло по 20 для отдельных каналов и 18 при совместной работе.

Все каналы имели удовлетворительную центровку, а наибольший вклад в ток пучка вносил второй канал. При этом эффективный диаметр пучка составлял около 2 см. На рис. 7 показан

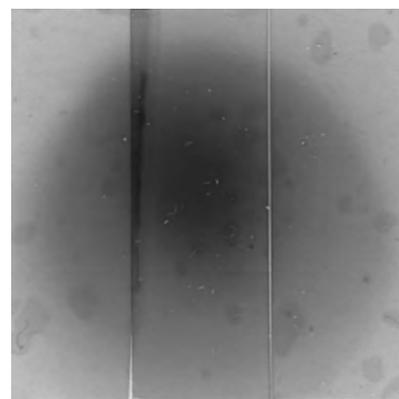


Рис. 7. Автограф электронного пучка, полученный при сведении трех пучков в одну точку на выходной фольге.

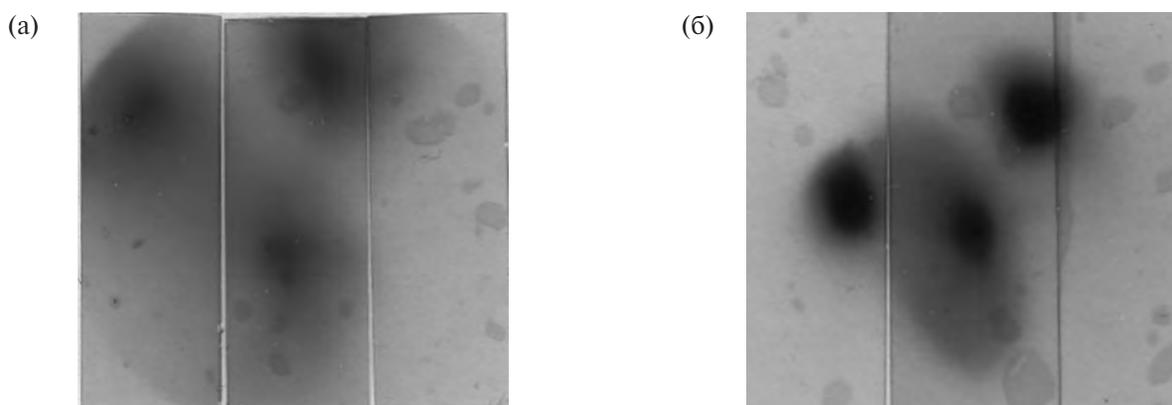


Рис. 8. Автографы электронных пучков: *a* – три пучка в одной точке с рассеивающими фольгами, *б* – три сфокусированных пучка без фольг.

автограф электронного пучка, полученный при сведении трех пучков в одну точку на выходной фольге, когда в трактах были установлены рассеивающие фольги, а отдельная фокусировка каждого пучка не проводилась.

Варьируя пространственное положение пучков и степень их фокусировки, можно формировать поля облучения различной конфигурации и равномерности. На рис. 8а показаны автографы трех пучков после прохождения трактов с рассеивающими фольгами, но без дополнительной фокусировки, а на рис. 8б – без фольг,

но при дополнительной фокусировке пучков. Положение пучков в пространстве может быть скорректировано в одну линию или точку.

Спектр энергии суммарного электронного пучка оценивался по профилю поглощенной дозы ускоренных электронов в силикатном стекле, для чего использовалась сборка из десяти детекторов СГД8 суммарной толщиной 18 мм, которая располагалась вплотную к центру выходной фольги. Результаты измерений поглощенной дозы представлены в табл. 3, а восстановленный спектральный состав пучка ускоренных элект-

Таблица 3. Поглощенная доза в силикатном стекле за один пуск ускорителя ( $P$ , крад)

Длительность импульса	Номер детектора									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 мм	67	65	67	58	43	28	14	4.7	1.9	0.6
12 мм	670	860	810	910	760	630	410	95	40	14

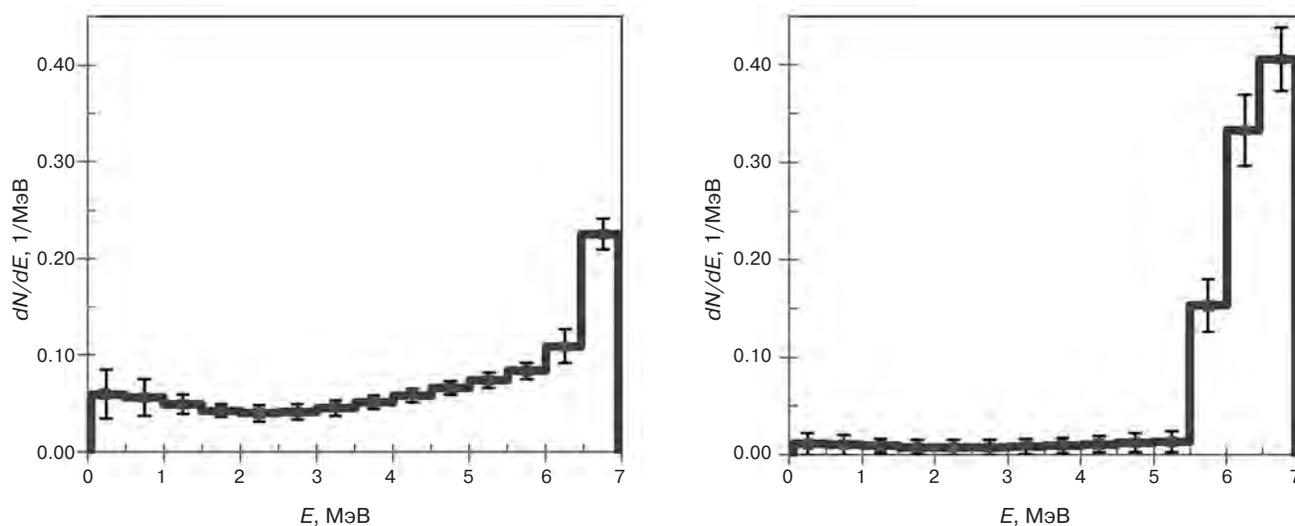


Рис. 9. Восстановленный спектральный состав пучка ускоренных электронов при длительности импульса 1 мм (слева) и 12 мм (справа).

тронов в групповом приближении, нормированный на один квант источника для длительности импульса 1 и 12 мм, показан на рис. 9.

В обоих случаях наибольшее количество электронов находится в группе с энергией 6.5–7 МэВ. Средняя энергия ускоренных электронов при длительности импульса 12 мм составляет примерно 6.1 МэВ, при длительности 1 мм – примерно 4.5 МэВ. При этом в длинном режиме работы установки спектр электронов близок к моноэнергетическому, в то время как в коротком режиме присутствуют электроны меньших энергий, энергетическая доля которых составляет примерно 20%. В коротком импульсе соотношение между количеством электронов с энергией менее 5.5 МэВ и с энергией более 5.5 МэВ составляет 1.4, в то время как в длинном равно 0.12, что коррелирует с длительностью импульса.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работ по наладке и изучению возможностей ускорителя СПРУТ, спроектированного для решения задач радиационной стойкости, подобраны режимы его работы и определены основные характеристики. Полный ток ускоренных электронов на площади  $30 \times 30 \text{ мм}^2$  при длительности импульса 12 мм составляет 1.3 А, при длительности импульса 1 мм равен 1.1 А. Расчетно-экспериментальным путем определен спектральный состав

пучка ускоренных электронов, при этом средняя энергия электронов для двух режимов работы находится в диапазоне от 4.5 до 6 МэВ.

Методом пространственной диагностики экспозиционной дозы тормозного излучения показано заметное влияние рассеивающей фольги, предназначенной для формирования поля облучения, на ток пучка (снижение на 18%). Одним из следующих этапов является определение характеристик пучка на исследуемом объекте.

Выявлено снижение тока пучка и средней энергии электронов с уменьшением длительности импульса излучения, что также составляет предмет для будущих исследований и оптимизации режима работы ускорителя.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вальднер О.А., Власов А.Д., Шальнов А.В.* Линейные ускорители. М.: Атомиздат, 1969.
2. *Ворогушин М.Ф., Гавриш Ю.Н., Демский М.И., Клинов А.П., Николаев В.М.* // Атомная энергия. 2003. № 2. С. 44.
3. *Терентьев Н.И., Казаков В.В., Лойко Ю.С.* // ВАНТ. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2017. № 2. С. 40.
4. *Бакулин Ю.П., Волкова А.В., Котов Д.К., Ноздрачев С.Ю., Харитонов А.В., Черепухин В.Г., Шибенко О.В.* // ВАНТ. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2007. № 3-4. С. 55.

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ  
ТЕХНИКА

УДК 53.07+537.6

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАРТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОГО  
ПОЛЯ В ЗАЗОРЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ЛАБОРАТОРНОГО  
ЭЛЕКТРОМАГНИТА

© 2025 г. В. Н. Глазков<sup>a, b, \*</sup>, Д. А. Малиницкий<sup>a</sup>, А. Х. Ряжапов<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, факультет физики  
Россия, 105066, Москва, ул. Старая Басманная, 21/4

<sup>b</sup> Институт физических проблем им. П.Л. Капицы Российской академии наук  
Россия, 119334, Москва, ул. Косыгина, 2

\* e-mail: glazkov@kapitza.ras.ru

Поступила в редакцию 30.01.2025 г.

После доработки 03.03.2025 г.

Принята к публикации 17.03.2025 г.

Предложен подход к определению и описанию распределения продольной и поперечной компонент магнитного поля в осесимметричном лабораторном электромагните, основанный на полиномиальном разложении индукции поля с учетом накладываемых уравнениями Максвелла ограничений. Показано, что предложенный подход позволяет получать высокую точность описания распределения магнитного поля при небольшом количестве измерений. Также он может представлять интерес для уточнения параметров лабораторного оборудования и использоваться в качестве учебной задачи лабораторного практикума при изучении свойств электромагнитного поля.

DOI: 10.31857/S0032816225030104

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Магнитное поле является распространенным способом воздействия на свойства образца в физическом эксперименте. Поэтому во многих случаях важно знать карту распределения магнитного поля в месте расположения образца. При конструировании новых магнитных систем этот вопрос анализируется еще на этапе проектирования, что позволяет заранее рассчитать необходимые характеристики. Расчеты такого типа используются как в промышленных задачах, так и при создании разнообразных научных приборов – от лабораторных спектрометров до ускорителей [1–5].

Однако в лабораторной практике нередко возникает ситуация, когда уже имеется некоторая магнитная система, точные характеристики которой и номенклатура используемых материалов изменены в ходе ремонта или утрачены. В этом случае расчет распределения магнитных полей *ab initio* оказывается бесполезен и необ-

ходимо восстановить карту распределения магнитного поля, измерив компоненты индукции магнитного поля в рабочей области магнитной системы.

Известно множество подходов к организации такого измерения, например, с использованием матрицы детекторов [6] или системы позиционирования датчика, позволяющей перемещать датчик магнитного поля относительно магнита [7, 8]. Точность такого прямого измерения ограничивается точностью позиционирования датчика и размером самого датчика, что ограничивает возможности определения распределения магнитного поля на масштабах менее сантиметра. Кроме того, изготовление системы позиционирования датчика является отдельной технической задачей.

Достаточно часто лабораторные магниты имеют осевую конструкционную симметрию. Для таких магнитных систем мы предлагаем подход, основанный на измерении магнитной индукции в относительно небольшом количе-

стве точек в интересующей области и восстановлении по этим измерениям полной картины распределения компонент магнитной индукции при помощи полиномиального разложения с учетом накладываемых уравнениями Максвелла ограничений.

Предложенный подход был опробован на лабораторном электромагните с двумя конфигурациями полюсов. Измерения показали, что для получения карты магнитного поля с практически значимой точностью достаточно небольшого количества точек измерения магнитной индукции, что позволяет использовать стандартные измерители магнитной индукции и простые в изготовлении приспособления для их позиционирования.

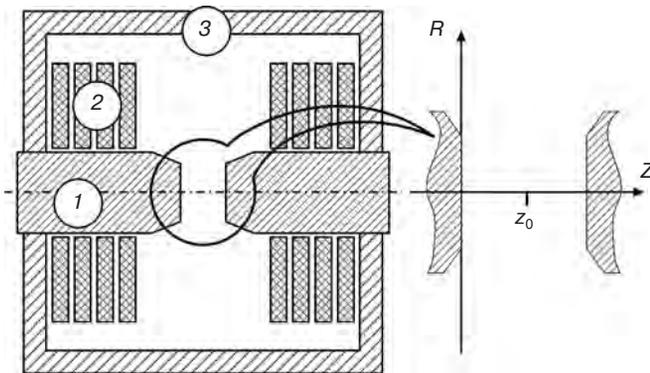
## 2. ПОЛИНОМИАЛЬНОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ С УЧЕТОМ УРАВНЕНИЙ МАКСВЕЛЛА ДЛЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ОСЕСИММЕТРИЧНОМ МАГНИТЕ

Для цилиндрической геометрии полюсов и катушек электромагнита (рис. 1) магнитное поле в зазоре между полюсами имеет только продольную  $B_z$  и радиальную  $B_r$  компоненты. Магнитная индукция  $\mathbf{B}(z, r)$  в центральной области зазора может быть разложена в ряд (выбор осей проиллюстрирован на рис. 1)

$$B_z(z, r) = \sum_{n, m \leq n} a_n^m (z - z_0)^m r^{n-m}, \quad (1)$$

$$B_r(z, r) = \sum_{n, m \leq n} b_n^m (z - z_0)^m r^{n-m}, \quad (2)$$

где  $z_0$  — координата экстремума продольной компоненты поля на оси магнитной системы (точка



**Рис. 1.** Схематическое изображение лабораторного электромагнита (1 — полюса, 2 — катушки, 3 — ярмо) и выбор системы координат для описания распределения магнитного поля в зазоре магнита.

$(z_0, 0)$  является седловой точкой в распределении модуля магнитной индукции в зазоре магнита).

Уравнения Максвелла задают связь между продольной и радиальной компонентами магнитной индукции в воздушном зазоре магнита:

$$\frac{\partial B_r}{\partial r} + \frac{B_r}{r} + \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial B_r}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial r} = 0. \quad (4)$$

Это накладывает связи на коэффициенты полиномиального разложения:

$$a_n^{m+1} (m+1) = -b_n^m (n-m+1), \quad (5)$$

$$a_n^m (n-m) = b_n^{m+1} (m+1), \quad (6)$$

откуда

$$a_n^{m-2} = -\frac{m(m-1)}{(n-m+2)^2} a_n^m, \quad (7)$$

$$b_n^{m-2} = -\frac{m(m-1)}{(n-m+2)^2 - 1} b_n^m. \quad (8)$$

Дополнительно можно отметить, что  $a_0^0$  имеет смысл индукции поля в седловой точке  $(z_0, 0)$ ;  $a_1^1 = 0$ , так как  $\partial B_z / \partial z(z_0, 0) = 0$ ;  $b_n^n = 0$  и  $a_n^{n-1} = 0$ , так как  $B_r = 0$  при  $r = 0$  (на оси магнита).

Эти условия показывают, что полиномиальные разложения для продольной и радиальной компонент ограничиваются одинаковой степенью полинома и есть только один свободный коэффициент для каждой степени полинома, что существенно упрощает задачу описания распределения полей:

$$B_z(z, r) = \sum_n A_n Z_n(z - z_0, r), \quad (9)$$

$$B_r(z, r) = \sum_n A_n R_n(z - z_0, r), \quad (10)$$

$$\text{где } Z_n(z - z_0, r) = \sum_{m \leq n} a_n^m (z - z_0)^m r^{n-m}, \quad (11)$$

$$R_n(z - z_0, r) = \sum_{m \leq n} b_n^m (z - z_0)^m r^{n-m} \quad (12)$$

и коэффициенты описаны в формулах (5), (6), а также  $a_n^n = 1$ . Для удобства использования коэффициенты  $a_n^m$  и  $b_n^m$  полиномов  $Z_n(z - z_0, r)$  и  $R_n(z - z_0, r)$  для вычисления аксиальной и радиальной компонент поля для  $n \leq 8$  приведены в табл. 1, 2.

Нечетные степени  $n$  полиномов в разложениях (1), (2) описывают асимметрию распределения поля относительно перпендикулярной к оси магнитной системы плоскости, проходя-

**Таблица 1.** Коэффициенты  $a_n^m$  полиномов  $Z_n(z - z_0, r)$  (11) для вычисления аксиальной компоненты индукции магнитного поля  $B_z(z, r)$

$n$	$m$								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	1								
1	0	0							
2	-1/2	0	1						
3	0	-3/2	0	1					
4	3/8	0	-3	0	1				
5	0	15/8	0	-5	0	1			
6	-5/16	0	45/8	0	-15/2	0	1		
7	0	-35/16	0	105/8	0	-21/2	0	1	
8	35/128	0	-35/4	0	105/4	0	-14	0	1

**Таблица 2.** Коэффициенты  $b_n^m$  полиномов  $R_n(z - z_0, r)$  (12) для вычисления радиальной компоненты индукции магнитного поля  $B_z(z, r)$  для  $a_n^n = 1$

$n$	$m$								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0								
1	0	0							
2	0	-1	0						
3	3/8	0	-3/2	0					
4	0	3/2	0	-2	0				
5	-5/16	0	15/4	0	-5/2	0			
6	0	-15/8	0	15/2	0	-3	0		
7	35/128	0	-105/16	0	105/8	0	-7/2	0	
8	0	35/16	0	-35/2	0	21	0	-4	0

шей через седловую точку  $(z_0, 0)$ . В большинстве случаев конструкция лабораторного электромагнита симметрична относительно этой плоскости и эти слагаемые могут быть либо отброшены, либо имеют дополнительную малость. В результате для симметричной конструкции полюсов даже при использовании полиномов восьмой степени для описания распределения поля остается всего шесть свободных параметров  $(A_0, A_2, A_4, A_6, A_8, z_0)$ .

### 3. ПРАКТИЧЕСКАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДИКИ

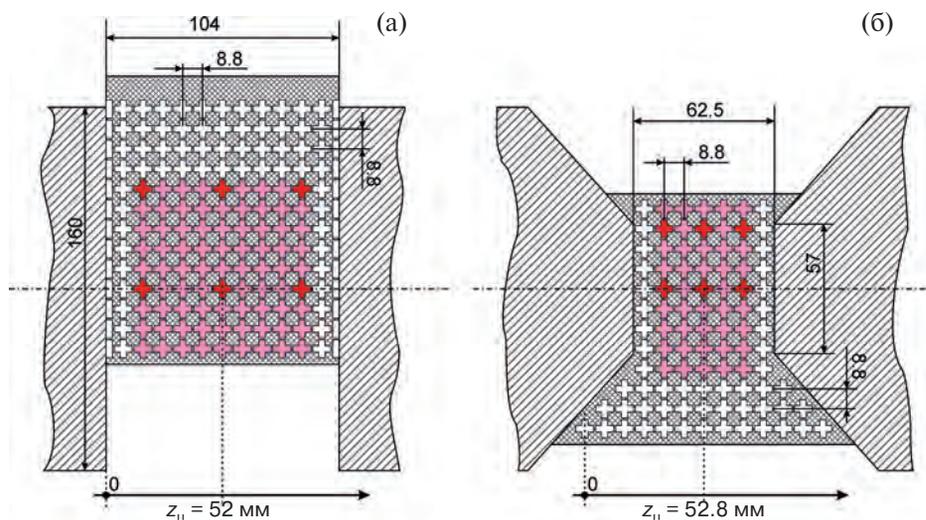
#### 3.1 Организация измерения индукции поля

Для проверки применимости предлагаемой методики было проведено измерение продольной и радиальной компонент индукции магнитного поля в двух конфигурациях полюсов

лабораторного электромагнита (рис. 2): с плоскими полюсами диаметром 160 мм и расстоянием между полюсами 104 мм и с сужающимися коническими полюсами с диаметром концов полюса 57 мм и расстоянием между полюсами 62.5 мм. В обоих случаях расстояние между полюсами и диаметры наконечников полюсов были близки, что является достаточно типичной ситуацией для лабораторных магнитов.

Измерения распределения поля проводили в центре зазора в диапазоне 0.4–0.8 Тл. Для измерения индукции магнитного поля использовался измеритель магнитной индукции Ш1-8.

Для позиционирования зонда измерителя магнитной индукции методом 3D-печати были изготовлены матрицы с крестообразными установочными гнездами для измерения продольной и радиальной компонент магнитной индукции (рис. 2).



**Рис. 2.** Схема использованных конфигураций полюсов электромагнита и конструкций матрицы для фиксации зонда измерителя магнитной индукции. Заливкой отмечены положения зонда, использованные для определения коэффициентов полиномиального разложения.

Центровка матриц в зазоре осуществлялась с помощью изготовленных методом 3D-печати кольцевых направляющих, плотно охватывающих полюса магнита, которые крепились к матрице. Размер чувствительной области датчика в измерителе магнитной индукции составляет около 1 мм, погрешность изготовления установочных гнезд и центровки матриц оказывается в несколько раз меньше. Шаг между центрами установочных гнезд равен 8.8 мм как вдоль оси магнита, так и в радиальном направлении. Один из рядов установочных гнезд находился на геометрической оси полюсов и в срединной плоскости зазора между полюсами. Выбор начала координат для отсчета координаты вдоль оси магнитной системы определяется соображениями удобства, он проиллюстрирован на рис. 2: для плоских полюсов мы измеряли расстояние от полюса, для конических полюсов – от центра крайнего установочного гнезда.

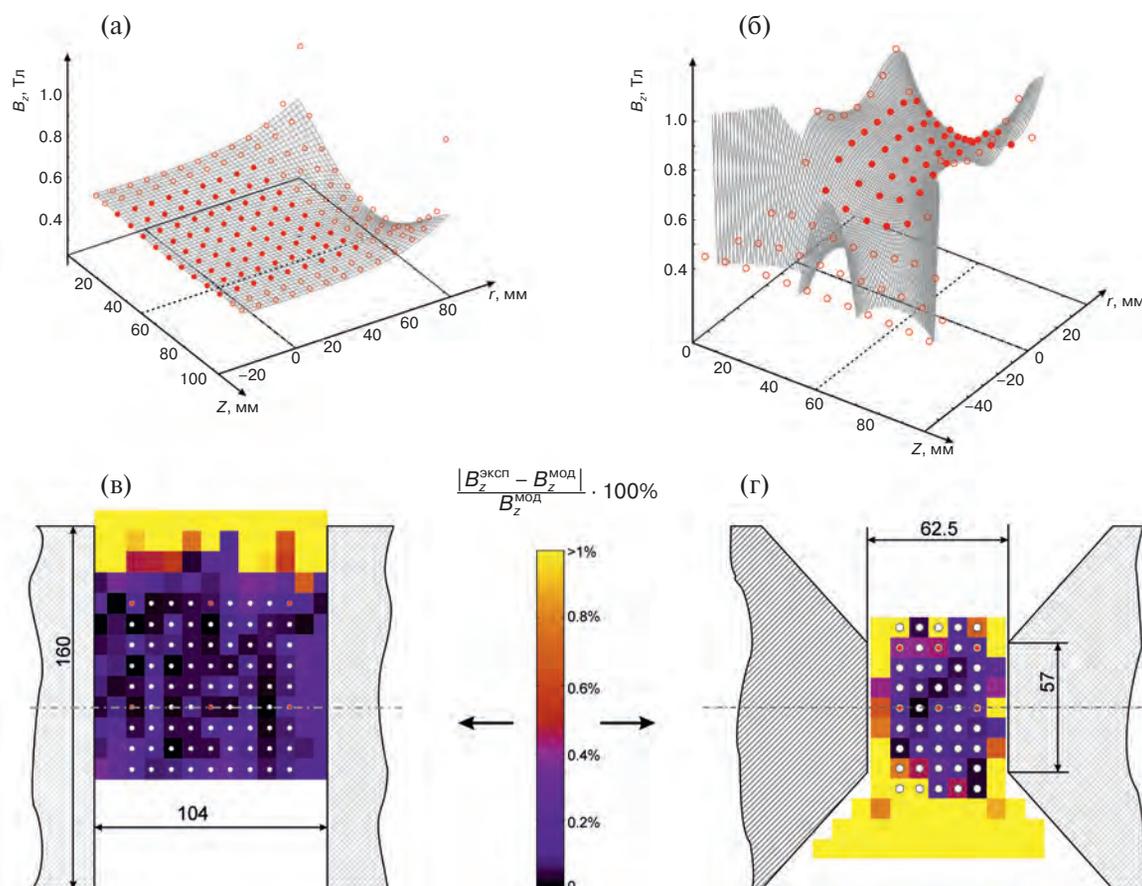
### 3.2. Применение полиномиальной модели для определения распределения магнитной индукции в зазоре магнита

Было проведено измерение величин продольной и радиальной компонент магнитной индукции в более чем 100 точках в зазоре магнита для обеих конфигураций полюсов. По результатам измерений продольной компоненты магнитной индукции для каждой конфигурации полюсов

определялся оптимальный набор параметров полиномиальной модели.

Сильная неоднородность поля вблизи углов полюсов не позволяет достаточно точно описать распределение магнитного поля по всей ширине зазора. Однако в представляющей практический интерес центральной области зазора магнита (соответствующие положения установочных гнезд отмечены розовой заливкой на рис. 2) оказалось достаточным применения полиномов шестой степени для описания распределения магнитной индукции с точностью около 0.2% для плоских полюсов и с точностью около 0.5% для конических полюсов (рис. 3). В качестве характерного примера учета реального распределения полей в магните можно привести положение седловой точки распределения поля в зазоре магнита ( $z_0, 0$ ): для плоских полюсов мы получили  $z_0 = 50.8 \pm 0.1$  мм (геометрический центр зазора между полюсами соответствует  $Z_{ц} = 52.0$  мм), для конических полюсов  $z_0 = 52.9 \pm 0.1$  мм (геометрический центр зазора между полюсами соответствует  $Z_{ц} = 52.8$  мм).

Выбор области для определения оптимального набора коэффициентов полиномиальной модели можно описать эмпирическим правилом: для плоских полюсов с ожидаемо большей однородностью поля в зазоре взята область шириной примерно 2/3 от ширины зазора и высотой примерно 1/2 от радиуса полюсов; для конических полюсов, концентрирующих силовые линии магнитного поля, но создаю-



**Рис. 3.** Сравнение измеренного распределения продольной компоненты вектора магнитной индукции и описания этого распределения в полиномиальной модели полиномом шестого порядка для плоских полюсов магнита (слева), для конических полюсов (справа): **а, б** – сравнение измеренных значений  $B_z$  (символы) и наилучшего описания в полиномиальной модели; **в, г** – цветовая карта модуля относительного отклонения вычисленных в полиномиальной модели значений магнитной индукции от измеренного.

щих более неоднородное поле, была выбрана область также шириной около 2/3 от ширины зазора и высотой чуть больше радиуса наконечника полюса.

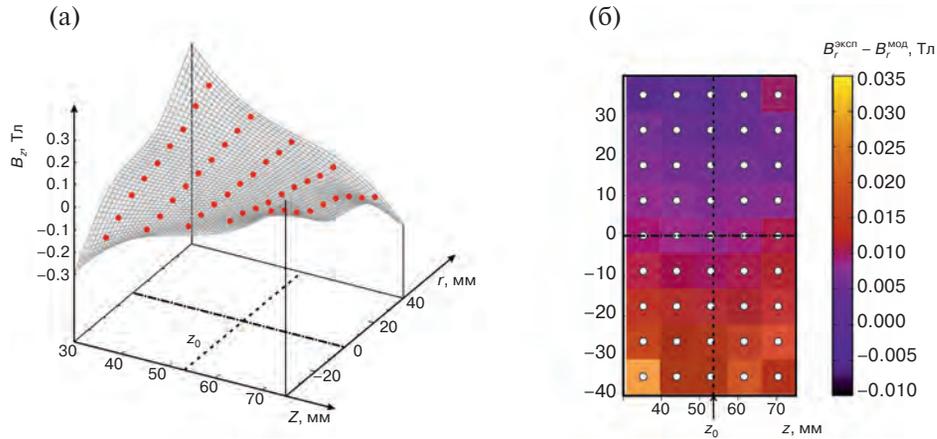
В случае более однородного поля в зазоре между плоскими полюсами оказалось необходимым более жесткое ограничение по высоте выбранной области (меньше радиуса полюса) из-за особенностей сходимости полиномиального ряда (1): широкая область почти однородного поля в центре переходит в неоднородное поле при вертикальном отклонении примерно на радиус полюса, что плохо описывается малым числом степеней полинома. Возможно, для таких случаев может найтись более удобный базис разложения, но, по нашему мнению, простота работы с полиномами (1), (2) (в практически более удобной записи (9), (10)) оправдывает ограничение рассматриваемой области.

По результатам подгонки данных для продольной компоненты вектора магнитной индук-

ции по уравнению (10) можно восстановить распределение радиальной компоненты индукции (рис. 4а), которое хорошо согласуется с проведенными измерениями в центральной области зазора. Это позволяет ограничиться только измерениями основной продольной компоненты вектора магнитной индукции в зазоре магнита для определения параметров полиномиального разложения.

Отметим, что наклон плоскости датчика магнитной индукции на малый угол  $\varphi$  легко может привести к тому, что радиальная компонента вектора магнитной индукции  $B_r$  и проекция продольной компоненты на нормаль к плоскости датчика  $\varphi B_z$  окажутся сравнимыми, так что вычисление радиальной компоненты магнитной индукции (10) может оказаться более точным, чем ее прямое измерение.

Например, для данных, представленных на рис. 4, допущение о наклоне плоскости датчика на  $0.7^\circ$  (что вполне допустимо как конструкцией



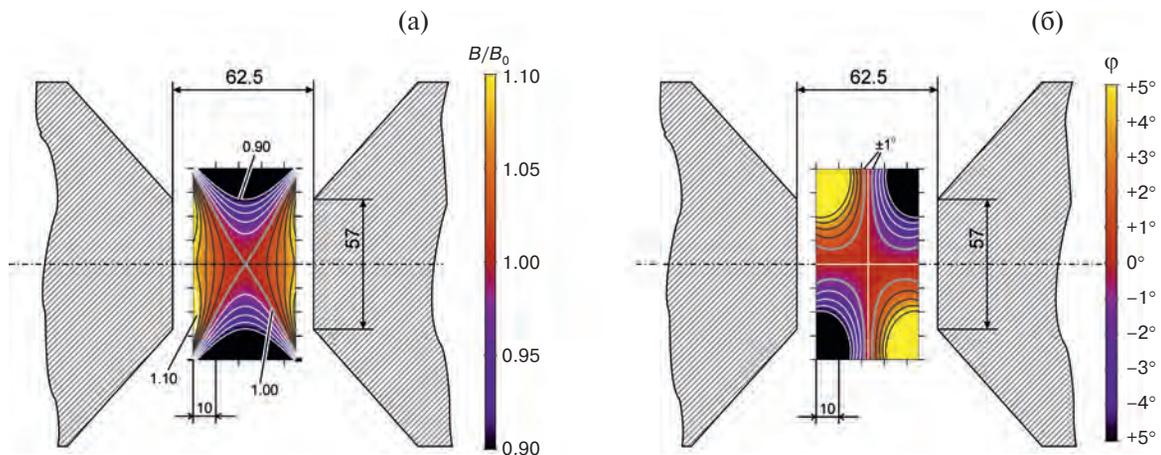
**Рис. 4.** а – Сравнение измеренного и вычисленного значений радиальных компонент вектора магнитной индукции для конических полюсов,  $B_r$  соответствует направлению вверх по рис. 2; б – разность измеренного и вычисленного значений радиальной компоненты вектора магнитной индукции.

измерителя магнитной индукции, так и точностью позиционирования шупа измерителя индукции в направляющих гнездах матрицы) уменьшает расхождение измеренных и расчетных значений радиальной компоненты магнитной индукции примерно вдвое, а остающееся расхождение (на уровне нескольких миллитесла при индукции продольного поля в центре магнита около 750 мТл), по-видимому, связано с систематическим наклоном или искажением формы измерительной матрицы на столь же малый угол (на рис. 4б видно, что различие вычисленных и измеренных значений систематически плавно меняет знак при переходе от точек выше оси магнита к точкам ниже оси магнита). Влияние этих малых отклонений ориентации датчика на измерение продольной компоненты вектора магнитной индукции имеет квадратичную по углу отклонения малость

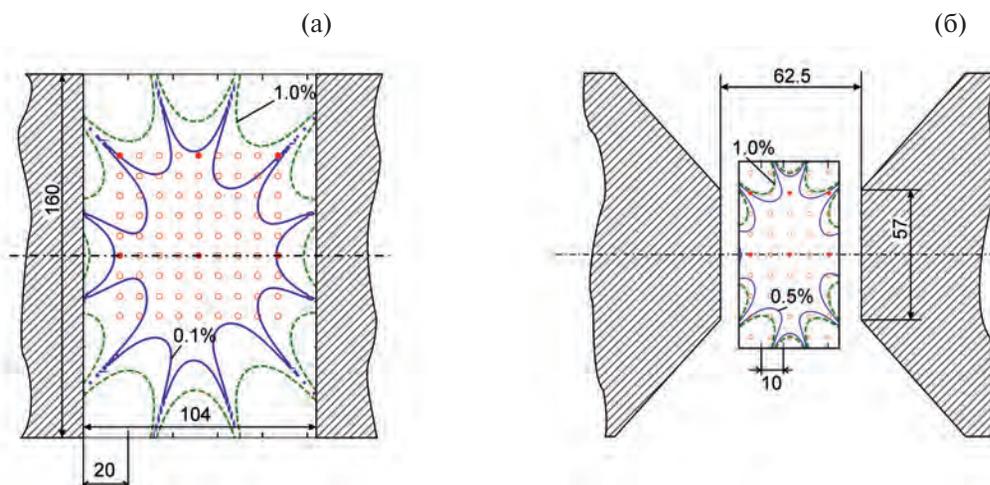
и гораздо менее существенно, поэтому вычисление радиальной компоненты индукции магнитного поля для достаточно однородных конфигураций поля оказывается более надежным, чем попытка их непосредственного измерения.

Таким образом, можно полностью восстановить карту распределения индукции магнитного поля в зазоре магнита, выделить область в центре зазора с отклонениями модуля магнитной индукции в заданных пределах или проанализировать расхождение направлений силовых линий магнитного поля в области нахождения образца (рис. 5).

Интересным для практических применений оказалось следующее наблюдение. Малое количество свободных параметров (для полинома шестой степени это пять параметров:  $z_0$ ,  $A_0$ ,  $A_2$ ,  $A_4$  и  $A_6$ ) позволяет обойтись весьма компактным набором точек для измерения значений магнит-



**Рис. 5.** а – Цветовая карта распределения модуля вектора магнитной индукции. Линии уровня проведены в интервале от 0.9 до 1.1 с шагом 0.02; б – цветовая карта распределения угла отклонения вектора магнитной индукции от оси. Линии уровня проведены в интервале от  $-5^\circ$  до  $+5^\circ$  с шагом  $1^\circ$ .



**Рис. 6.** Сравнение значений  $B_z$ , вычисленных в полиномиальной модели с коэффициентами, определенными по всем положениям датчика и по контрольному набору из шести положений датчика, выделенных заливкой: **а** — для плоских полюсов, **б** — для конических полюсов.

ной индукции без существенного ухудшения качества описания распределения магнитного поля в зазоре магнита.

Мы проверили, что для исследованных конфигураций полюсов сравнимое качество описания распределения магнитного поля в центральной области зазора получается как при использовании описанной ранее большой выборки позиций зонда (81 позиция для плоских полюсов и 45 позиций для конических полюсов, отмечены розовой заливкой на рис. 2), так и при использовании контрольной выборки из всего шести измерительных позиций, отмеченных красной заливкой на рис. 2, 3в, 3г, расположенных по оси магнита и по периметру центральной области (рис. 6). Положения экстремума поля на оси магнита  $z_0$  различаются в наших случаях для двух способов вычисления оптимальных коэффициентов полинома на 0.2–0.3 мм. Практически во всей центральной области зазора различия значений продольной компоненты вектора магнитной индукции, вычисленных с использованием полиномиальных моделей с коэффициентами, определенными по большому и малому наборам положений датчика, лежит в пределах 1%, а в заметной части центральной области это различие заметно меньше (см. рис. 6).

### 3.3. Возможность применения в учебной практике

Помимо практической пользы для определения распределения магнитного поля в лабораторных установках, предложенный подход к описанию магнитного поля в зазоре электромагнита может быть частью учебного эксперимента.

Измерение компонент вектора магнитной индукции с использованием позиционирующей датчик матрицы позволяет обучающемуся набрать свой собственный массив данных для имеющейся геометрии полюсов. Использование простого в применении полиномиального описания поля, основанного на уравнениях Максвелла, позволяет обучающемуся проверить, как измеренное распределение полей соответствует этим уравнениям и на практике убедиться в их применимости для описания электромагнитных полей.

## 4. ВЫВОДЫ

Предложена методика эмпирического определения полной карты магнитного поля в зазоре лабораторного магнита, основанная на полиномиальной подгонке измеренного распределения продольной компоненты магнитной индукции, с учетом накладываемых уравнениями Максвелла ограничений.

Проведена практическая проверка предложенной методики на двух конфигурациях полюсов лабораторного магнита, показавшая, что достаточно точное описание распределения поля в области расположения образца можно получить с использованием весьма компактного набора измеренных значений магнитной индукции (шесть позиций датчика для практически значимой области размером примерно  $5 \times 5 \times 5 \text{ см}^3$ ), не прибегая к детальному сканированию распределения полей. Это позволяет легко использовать предложенную методику для восстановления картины распределения маг-

нитного поля в лабораторных магнитных системах с осесимметричной конструкцией полюсов, а также применять этот подход в учебных экспериментах.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке НИУ ВШЭ (грант НУГ-24-00-011).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. М.: Академия, 2005.
2. Ilin A.V., Chang Diaz F.R., Gurieva Y.L., I'in V.P. Accuracy Improvement in Magnetic Field Modeling for an Axisymmetric Electromagnet. NASA Technical Paper 2000-210194. 2000.
3. Kedzia P., Czechowski T., Baranowski M., Jurga J., Szcześniak E. // Appl. Magn. Reson. 2013. V. 44. P. 605. <https://doi.org/10.1007/s00723-012-0427-5>
4. Герус С.В., Локк Э.Г., Анненков В.Ю. // Изв. РАН. Серия физическая. 2021. Т. 85. С. 1538. <https://doi.org/10.31857/S0367676521110107>
5. Балдин А.А., Волошина И.Г., Перепелкин Е.Е., Полякова Р.В., Российская Н.С., Шаврина Т.В., Юдин И.П. // ЖТФ. 2007. Т. 77. № 11. С. 7. <https://doi.org/10.1134/S1063784207110023>
6. Фахрутдинов А.Р., Фаттахов Я.В., Шагалов С.А., Хабипов Р.Ш., Баязитов А.А. // ПТЭ. 2019. № 4. С. 150. <https://doi.org/10.1134/S0032816219040074>
7. Балдин А.А., Гуськов Б.Н., Долгий С.А., Кадыков М.Г., Малинина Л.В., Николаевский Г.П., Перепелкин Е.Е., Российская Н.С., Семашко С.В., Стариков А.Ю., Старикова С.Ю., Юдин И.П. Измерение объемной карты магнитного поля для магнитооптического спектрометра МАРУСЯ. Дубна: ОИЯИ, Р13-2006-67, 2006.
8. Omelyanchik A., Marques J.L., Rivas M., Rodionova V., Fabio Canepa F., Peddis D. // Meas. Sci. Technol. 2023. V. 34. P. 107001. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/acde9b>

УДК 007.51

## СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ НАСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ РЕЗОНАНСНОГО КОНТУРА ЯМР-ДАТЧИКОВ РЕЗОНАНТЪЕ 2.2

© 2025 г. А. В. Гунбин<sup>а,\*</sup>, А. В. Ткачев<sup>а</sup>, Н. Е. Гервиц<sup>а</sup>

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

*e-mail: anthony.gun@inbox.ru*

Поступила в редакцию 22.11.2024 г.

После доработки 06.12.2024 г.

Принята к публикации 29.12.2024 г.

Система автоматической настройки частоты была разработана и реализована для датчиков, используемых в спектроскопии ядерного магнитного (ЯМР) и квадрупольного (ЯКР) резонансов. В ее основе лежат доступные технологии, позволяющие собрать и подготовить такую систему для любого датчика вне зависимости от способа управления. Управляющая электротехническая часть реализована на платформе Arduino и включает совместимые с платформой модули: шаговый двигатель и сервопривод. Оснастка для размещения управляющей системы была изготовлена с помощью аддитивных технологий, что упростило процесс прототипирования и создания готовой системы. Благодаря доступности и низкой стоимости компонентов, система автоматической настройки может быть адаптирована и настроена для любых датчиков ЯМР/ЯКР. При проведении эксперимента система автоматической настройки позволила исключить ручную настройку датчика в процессе эксперимента и уменьшить временные затраты на эксперимент.

DOI: 10.31857/S0032816225030116

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Магнитно-резонансная спектроскопия твердого тела часто включает эксперименты, где измеряются спектры, растянутые в широком частотном диапазоне, что представляет собой длительный и монотонный процесс. Экспериментатор повторяет рутинную настройку оборудования после каждого изменения частоты, зачастую такие эксперименты занимают большие временные интервалы. В датчике для магнитно-резонансной спектроскопии требуется настройка резонансного RLC-контура, в котором частота изменяется в зависимости от изменения емкости конденсатора. Конструкция такого датчика предполагает изменение емкости конденсатора путем изменения положения штока вручную.

Такие широкие спектры часто встречаются в ядерно-резонансной спектроскопии твердого тела: например, в работе [1] для соединения

$\text{Ba}_3\text{Cu}_3\text{In}_4\text{O}_{12}$  спектр ЯКР  $^{115}\text{In}$  обнаруживается в частотном диапазоне от 16 до 34 МГц и в таком же интервале (примерно 20 МГц) – магнитно-возмущенный ЯКР  $^{63,65}\text{Cu}$ . В работе [2], где спектр  $^{209}\text{Bi}$  в соединении  $\text{BiFeO}_3$  получен в диапазоне частот от 40 до 140 МГц, или в работе [3], где спектр  $^{63,65}\text{Cu}$  в соединении  $\text{LiCu}_2\text{O}_2$  снимался в диапазоне от 60 до 160 МГц, организация эксперимента требовала еще большего количества перенастроек датчиков.

В экспериментальной части магнитно-резонансной спектроскопии используются, как правило, трубчатые датчики, помещаемые в цилиндрическую шахту криостата или магнитной системы. Шток управляет переменным конденсатором или индуктивной катушкой – таким образом осуществляется настройка резонансного контура на необходимую частоту и на уровень согласования в случае двухштокового решения. В основном применяются конструкции датчиков с одним из двух типов управления.

Один из вариантов управления — схема с продольным движением управляющего штока. Вторым вариантом — схема с вращательным движением (рис. 1) [4].

Необходимость автоматизации подтверждается в работах [5, 6], авторы которых разработали и описали свои системы для автоматического управления датчиками. Особенностью таких систем автоматической настройки является уникальность и специфичность, так как такие устройства не производятся на промышленном уровне и остаются уделом коллективов экспериментаторов. Поэтому каждая система настройки создана в единственном экземпляре и соответствует только определенному датчику. Что касается коммерчески доступных систем автоматической настройки [7–9], то их стоимость достаточно велика (может составлять десятки процентов стоимости магнитной системы), а сами эти системы настроены также строго на конкретные типы датчиков.

Представленная в данной работе система автоматической настройки частоты резонансного контура Резонатье 2.2 создана с целью изменения парадигмы непосредственного присутствия экспериментатора в зоне проведения эксперимента и исключения ручного управления датчиком. Она лишена описанных выше недостатков благодаря своей общедоступности и модульности. Используемые электротехнические модули находятся в общем доступе, а воспроизводимая оснастка позволяет адаптировать систему под любой датчик. Программное обеспечение распространяется на условиях свободного лицензионного договора и легко подстраивается под задачи эксперимента.

Система Резонатье 2.2 разработана для датчика с поступательным движением штока. Благодаря гибкости и открытости система Резонатье 2.2 может быть адаптирована для датчиков с посту-

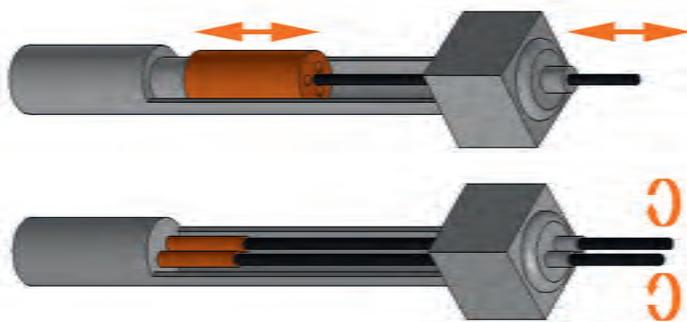
пательно-вращательной схемой управления с минимальными доработками (второй шаговый двигатель для второго штока и измененная оснастка).

## 2. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ РЕЗОНАТЬЕ 2.2

Система автоматической настройки частоты резонансного контура для датчиков с ручной настройкой Резонатье 2.2 представляет собой комплекс устройств: автоматический настройщик и коаксиальный переключатель. Главным устройством системы является автонастройщик Резонатье 2.2, который монтируется на датчик и является несущим каркасом для основных электромеханических устройств. Автонастройщик представляет собой надстройку для датчика и несет полезную нагрузку в виде микропроцессора ATmega328P, который обеспечивает связь всех модулей системы с ПК и прямое управление штоком датчика (рис. 2).

Коаксиальный переключатель RS Coaxial Switch 651-850 соединен с сервоприводом, управляемым Резонатье 2.2; он позволяет соединять коаксиальный кабель от датчика с цифровым анализатором спектра или спектрометром в зависимости от реализуемого режима работы (рис. 2).

Для реализации автоматизированного управления датчиком была выбрана платформа Arduino и вариация Nano. Arduino Nano V3.0 (рис. 3) — платформа, в основе которой лежит микроконтроллер ATmega328P семейства AVR с тактовой частотой 16 МГц [10]. При подключении Arduino к компьютеру используются расположенный на плате чип USB-UART CH340C и интерфейс формата USB Type-C. Связь платформа–компьютер осуществляется посредством USB-кабеля, для обработки полученных данных



**Рис. 1.** Схематичное изображение датчика с поступательным движением штока (сверху) и с вращательным (снизу). Черным цветом отмечены штоки, оранжевым — конденсаторы.

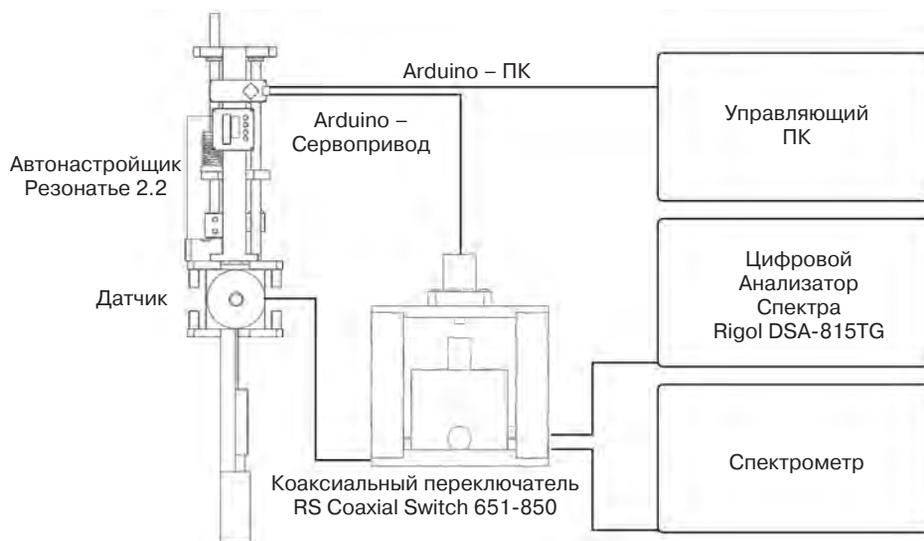


Рис. 2. Общая схема реализации Резонансье 2.2.

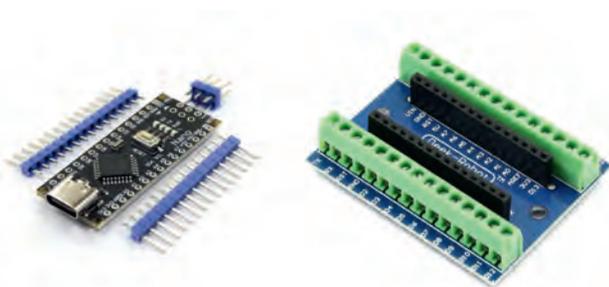


Рис. 3. Платформа Arduino Nano V3.0 с интерфейсом USB Type-C и терминальный адаптер.

и отправки команд на компьютер используется драйвер, работающий в режиме эмуляции последовательного виртуального COM-порта.

Для упрощения монтажа навесного оборудования используется терминальный адаптер для Arduino Nano (рис. 3). Кроме того, терминальный адаптер способствует оперативной замене вышедших из строя компонентов или добавлению новых функций, так как такой способ коммутации не требует пайки.

Платформа Arduino Nano V3.0 полностью удовлетворяет требованиям системы и обладает

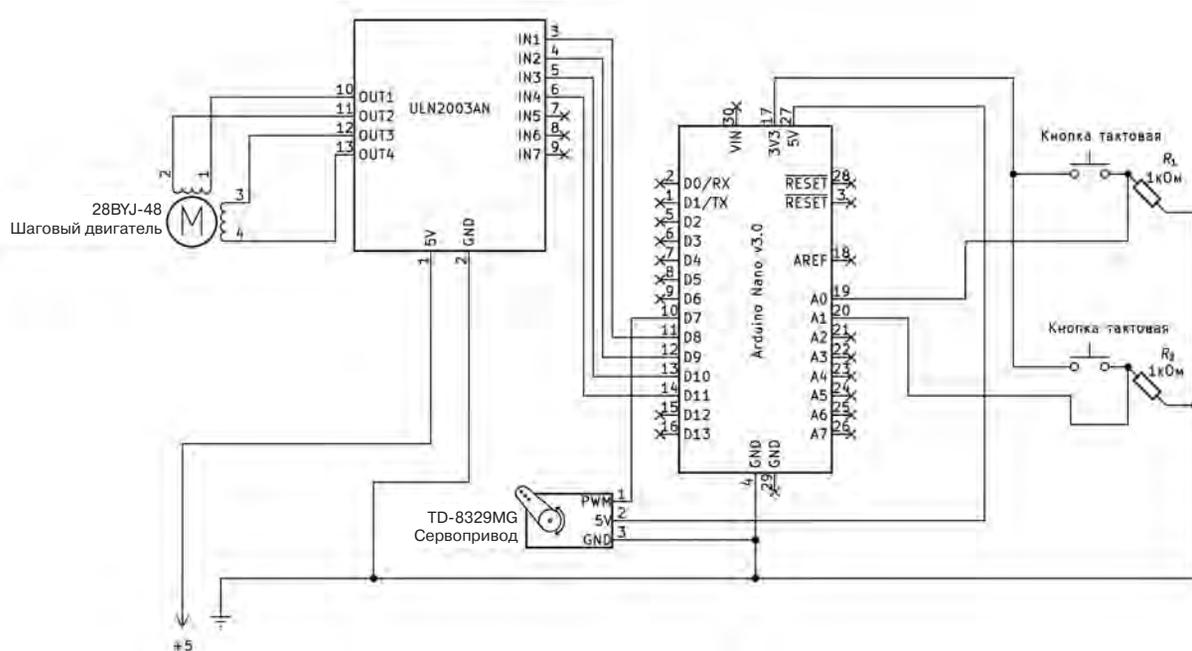


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема автоматического настройщика частоты Резонансье 2.2.

компактным формфактором. Плата имеет 14 цифровых входов/выходов, 8 аналоговых входов, выходы 5 В и 3.3 В. Плата необходима для связи управляющей программы на компьютере с электронно-механической частью системы.

Принципиальная схема подключения компонентов и устройств системы приведена на рис. 4. Далее будет приведено подробное описание устройства и работы ее отдельных блоков.

### 3. СИСТЕМА НАСТРОЙКИ ДАТЧИКА

Система автоматического управления позиционируется на оснастке, изготовленной посредством инженерной печати на FDM-3D-принтере (Fused Deposition Modelling – печать

методом послойного наложения материала) из полиэтилентерефталатгликоля (PET-G). Оснастка представляет собой П-образную конструкцию, на которой располагаются все компоненты системы (рис. 5).

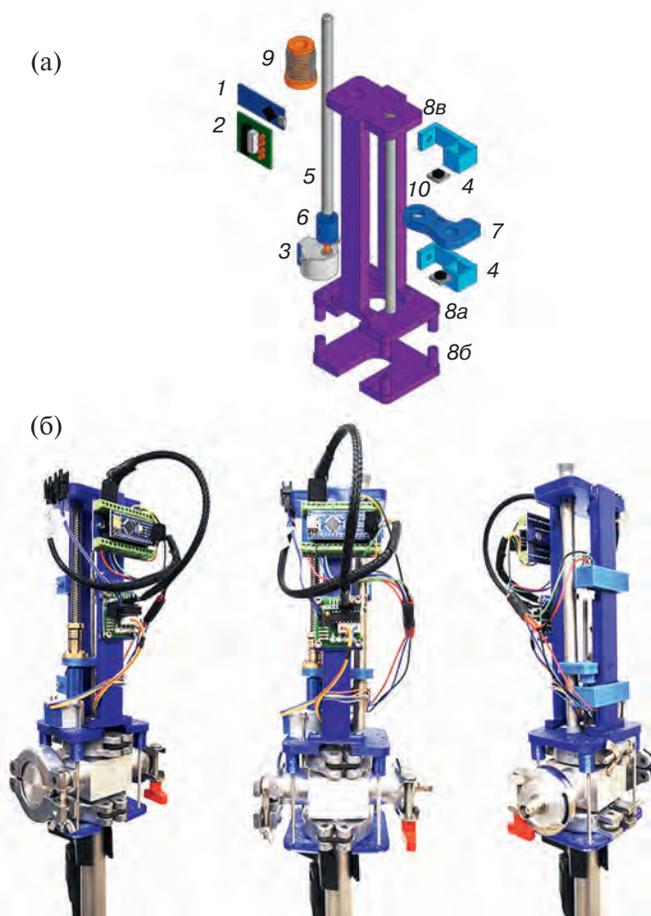
Несущая конструкция автонастройщика крепится к датчику посредством зажатия коммутационной головы датчика между опорной пластиной *8а* и прижимной пластиной с вырезом *8б*. Опорная пластина является основной частью конструкции, на ней закрепляются все детали автоматического настройщика. Опорная пластина *8а* располагается на верхней части датчика, а прижимная пластина *8б*, располагаемая под головой датчика, с помощью винтов надежно фиксирует конструкцию на датчике.

Трапецевидный винт *5* центрируется при помощи подшипника скольжения и поперечной пластины *8в*, которая также необходима для упрочнения конструкции. Во избежание смещения крепежной пластины и блокирования штока датчика в конструкции предусмотрена направляющая *10* с прорезиненной опорой, что сохраняет подвижность системы относительно продольной оси датчика.

Шток, которым настраивается частота резонансного контура датчика, управляется с помощью шагового двигателя 28BYJ-48 и платы управления ULN2003AN [11]. Четырехфазный шаговый двигатель 28BYJ-48 обладает высоким коэффициентом редукции 1/64, что позволяет очень точно позиционировать шток датчика ( $5.625^\circ$  поворота винта *5* за шаг).

Для управления шаговым двигателем на платформе Arduino задействуются 4 цифровых выхода D8–D11 (рис. 4). В платформе Nano нет разъема для подключения внешнего питания, поэтому во избежание наводок и перегрузки платформы, питание для шагового двигателя 5 В подведено от внешнего блока питания, а именно, от блока питания компьютера, используемого для управления Резонатье 2.2. Важно отметить, что внешний источник питания и платформа Arduino должны иметь одинаковую землю.

Максимальный ход штока датчика, используемого в проекте, составляет 50 мм. За один полный оборот вала двигателя шток смещается на 1.25 мм. За один шаг двигателя шток смещается приблизительно на 0.02 мм, что составляет смещение на 0.04 %. Такая избыточная точность перемещения штока позволяет соблюдать прецизионность при настройке колебательного



**Рис. 5.** а – Проект автонастройщика; б – готовая система Резонатье 2.2 на датчике: 1 – Arduino Nano, 2 – плата управления ULN2003AN, 3 – шаговый двигатель 28BYJ-48, 4 – кнопки Н6 (концевые выключатели) с креплением, 5 – трапецевидный винт TR8×8, 6 – муфта соединительная 5×8, 7 – планка, управляющая штоком датчика, 8 – PET-G-несущая конструкция, состоящая из опорной пластины *8а*, прижимной пластины *8б* и поперечной пластины *8в*, 9 – ходовая гайка Т8, 10 – направляющая.

контура датчика и сохранять высокую воспроизводимость положения штока.

Вал шагового двигателя с помощью муфты  $5 \times 8$  (6 на рис. 5) жестко соединен с трапециевидным винтом  $TR8 \times 8$  длиной 150 мм (5). Жесткая связь между штоком датчика и гайкой Т8 на трапециевидном винте осуществлена с помощью планки 7, напечатанной на FDM-3D-принтере. Во избежание люфтов в связи “трапециевидный винт – гайка” применяется разрезная подпружиненная ходовая гайка Т8 (9).

Ограничители крайних положений крепежной пластины и штока (концевые выключатели) реализованы с помощью тактовых кнопок Н6 (4), при достижении которых крепежная пластина нажимает верхний или нижний концевой выключатель. Концевые выключатели соединены с выходом 3.3 В на платформе Arduino через резистор емкостью 1 кОм и находятся в нормально разомкнутом состоянии (рис. 4). Когда концевой выключатель не нажат, на аналоговый вход платформы подается нулевое напряжение, выход заземлен на пин GND платформы Arduino. При нажатии на концевой выключатель крепежной пластиной на аналоговый вход подается напряжение 3.3 В. При появлении напряжения на аналоговых входах для нижнего  $A_0$  и для верхних  $A_1$  концевых выключателей система останавливается программой – крайнее положение штока датчика достигнуто. Наличие концевых выключателей позволяет избежать саморазрушения системы в случае нештатного поведения управляющей платформы.

#### 4. УПРАВЛЕНИЕ КОАКСИАЛЬНЫМ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕМ

Для настройки частоты колебательного контура необходимо подключить датчик к анализатору спектра и провести настройку, для измерения спектра датчик отключается от анализатора спектра и подключается к спектрометру. Такая схема подключения и настройки датчика требует присутствия оператора и постоянного ручного переключения либо использования дорогостоящего малошумного реле с хорошей изоляцией между выводами, способного при этом пропускать мощные импульсы.

Для автоматизации процесса была реализована схема с механическим коаксиальным переключателем RS Coaxial Switch 651-850 с двумя выходами и одним входом. RS Coaxial Switch

651-850 обладает малым значением прямых потерь, менее 0.1 дБ, коэффициентом стоячей волны (КСВ) в пределах 1.1 и показателем изоляции более 60 дБ при частоте до 500 МГц. На вход подключается датчик, на выходы, между которыми происходит переключение, подключаются спектрометр и измеритель амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). Для программного управления с помощью платформы Arduino Nano были подготовлены PET-G-оснастка и сервопривод (рис. 6). Цифровой сервопривод TD-8329MG (1) подключается к выходу Arduino 5 В и управляется через цифровой выход  $D_7$  (рис. 4).

Сервопривод TD-8329MG развивает крутящий момент 1.7 Н·м (при напряжении питания 4.8 В) и работает в пределах угла поворота  $180^\circ$  [12]. Такого усилия достаточно для плавного и быстрого поворота вала коаксиального переключателя. Сервопривод напрямую управляет валом переключателя и поворачивается на про-

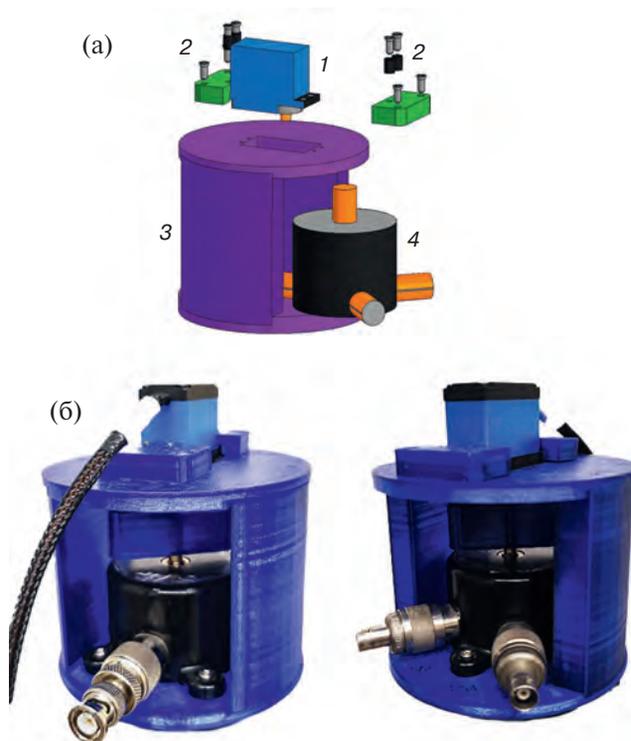


Рис. 6. а – Проект управляющей системы коаксиального переключателя; б – реализация в рамках готовой системы Резонанье 2.2: 1 – сервопривод TD-8329MG, 2 – виброподвес на сайлентблоках, 3 – PET-G-оснастка, 4 – коаксиальный переключатель RS Coaxial Switch 651-850.

граммно заданный угол  $100^\circ$  между крайними положениями коаксиального переключателя. Поскольку переключения сервопривода кратковременные и исключительные (других действий не выполняется), сервопривод подключен к выходу Arduino 5 В без риска нанесения ущерба платформе.

Во избежание вибраций и смещений спроектирована и реализована система подвесов с резиновыми сайлентблоками. Сервопривод имеет подвижное крепление к оснастке и может смещаться в горизонтальной плоскости (2 на рис. 6).

## 5. ПРОГРАММНАЯ ЧАСТЬ

Применение LabVIEW 2020 Community Edition для системы автоматической настройки датчика обусловлено тем, что спектрометр реализован в той же среде разработки [13]. Для управления платформами Arduino в LabVIEW 2020 интегрирована библиотека Maker Hub [14]. При подключении Arduino с помощью LabVIEW в контроллер загружается прошивка и контроллер становится внешним устройством ввода-вывода информации, в котором не содержится исполняющей программы, а основная программа выполняется на компьютере.

Используемый в качестве измерителя АЧХ современный анализатор спектра с опцией тре-

кинг-генератора RIGOL DSA815-TG соединен с компьютером через USB-интерфейс. Производитель предлагает обширный набор программного обеспечения для работы с ним в ОС Windows, в том числе посредством NI LabVIEW. Соответствующие инструменты позволяют не только задавать основные настройки прибора (диапазон частот, амплитудные характеристики и др.), но и получать кривую частотно-зависимого отклика исследуемой электрической цепи в реальном времени, в данном случае резонансного контура ЯМР-датчика. Максимально возможная частота обновления кривой равняется примерно 5 Гц, при этом она заметно ниже таковой в локальном режиме работы прибора, однако ее вполне хватает для плавной настройки датчика.

С использованием этих поставляемых производителями инструментов в среде NI LabVIEW была реализована программа управления Резонатье 2.2. Программа управления (рис. 7) поддерживает три режима работы:

- прямое управление отдельными элементами системы Резонатье 2.2;
- режим автоматической настройки, запускаемый непосредственно из интерфейса программы;
- внешнее управление Резонатье 2.2 посредством TCP (Transmission Control Protocol).

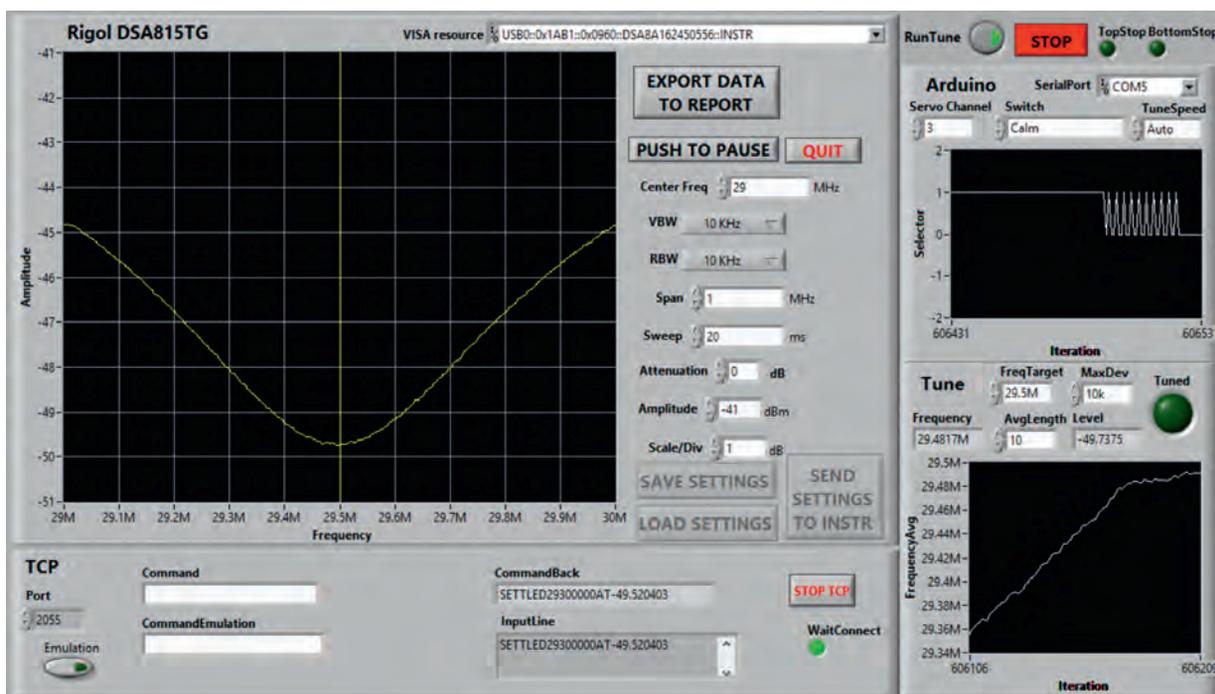


Рис. 7. Интерфейс программы управления системой Резонатье 2.2.

Режим 1 нужен в основном в начале работы для настройки анализатора спектра и относительно быстрой перестройки датчика в широком диапазоне. В этом режиме пользователь может принудительно переключить датчик на анализатор спектра или спектрометр (параметр *Switch*), задать направление и скорость движения штока датчика (параметр *TuneSpeed*), а также менять стандартные параметры отображения анализатора спектра и некоторые служебные параметры. При этом выводятся АЧХ датчика на графике (*Amplitude vs Frequency*), две оценки текущей резонансной частоты: простой минимум кривой АЧХ (*Frequency*) и плавающее среднее этого параметра *FrequencyAvg*, а также уровень согласования датчика в децибелах (*Level*).

В режиме 2 целевая частота задается параметром *FreqTarget* или строковой командой *SET* с указанием целевой частоты в герцах. На коаксиальный переключатель автоматически подается команда подсоединения датчика к анализатору спектра, а параметр *Stepper* переключается на значение *Auto*, так что направление движения штока датчика определяется знаком разницы целевой и текущей резонансных частот. При приближении к целевой частоте реализовано снижение скорости перемещения штока для точного позиционирования. Настройка производится до устойчивого (в течение 10 с) уменьшения модуля этой разницы ниже допустимого интервала *MaxDev*, после этого коаксиальный переключатель соединяет датчик со спектрометром и выдается сообщение о завершении настройки со значением уровня согласования на этой частоте.

Наконец, третий режим отличается от второго тем, что все взаимодействие с программой происходит через команды и сообщения, передаваемые через ТСР между различными рабочими станциями или различными программами в пределах одной рабочей станции. Этот режим, с одной стороны, позволяет унифицировать протокол взаимодействия с Резонанье 2.2, избегая привязки к конкретной программной среде, с другой стороны, использовать отдельную рабочую станцию для настройки датчика как независимый прибор.

Использование внешнего управления позволяет как запускать ЯМР-эксперимент с автоматизированной разверткой по частоте, так и периодически проверять и корректировать настройку датчика при иных длительных экспериментах,

таких как развертка по полю и по мощности радиочастотных импульсов, измерение скоростей ядерной спин-спиновой и спин-решеточной релаксации. При запуске программа находится в режиме ожидания подключения к ней клиента (программы проведения автоматизированного эксперимента ЯМР), после установления соединения между ними происходит обмен сообщениями, по окончании эксперимента программа вновь переходит в режим ожидания.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение системы автоматизированной настройки датчика в экспериментальной деятельности позволяет освободить испытателя от рутинных действий по ручной настройке эксперимента и вывести его из зоны проведения эксперимента, так как система поддерживает удаленное управление. Кроме того, результаты не зависят от человеческого фактора (визуальный контроль кривой согласования, неточность в установке штока датчика) и имеют высокий уровень воспроизводимости настройки.

Использование аддитивных технологий в виде FDM-3D-печати позволяет адаптировать систему автоматической настройки для различных датчиков путем подготовки соответствующей оснастки. С точки зрения электрической схемы системы, она обладает доступностью, простотой в обслуживании и высоким уровнем ремонтопригодности.

Система была успешно испытана в длительном эксперименте ЯМР  $^{57}\text{Fe}$  в нулевом внешнем магнитном поле на серии образцов  $\text{Bi}_x\text{Nd}_{1-x}\text{FeO}_3$ . Применение автонастройщика в значительной степени сократило временные затраты на постоянную перенастройку датчика и позволило задействовать дополнительное время для проведения эксперимента, так как система может работать в автоматическом режиме круглосуточно.

Система автоматической настройки Резонанье 2.2 обладает компактными размерами, простотой установки и понятной схемой подключения. Реализация системы на платформе Arduino и с помощью FDM-3D-печати позволяет в кратчайшие сроки внести необходимые изменения в схему и актуализировать автоматическую настройку для другого датчика с похожим способом настройки колебательного контура.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gippius A.A., Gervits N.E., Tkachev A.V., Maslova I.S., Volkova O.S., Vasiliev A.N., Büttgen N., Kraetschmer W., Moskvina A.S.* // Phys. Rev. B. 2012. V. 86. P. 155114.  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.86.155114>
2. *Буш А.А., Гунпиус А.А., Залесский А.В., Морозова Е.Н.* // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 78. С. 841.
3. *Sadykov A.F., Piskunov Y.V., Ogloblichev V.V. et al.* // Phys. Met. Metallogr. 2019. V. 120. P. 646.  
<https://doi.org/10.1134/S0031918X19050156>
4. *Гунпиус А.А., Журенко С.В., Ткачев А.В.* Экспериментальная низкотемпературная ЯМР-спектроскопия конденсированного состояния. М.: МГУ. 2021. ISBN: 978-5-8279-0191-4
5. *Геращенко А.П.* Спектроскопия ЯМР в исследованиях электронных и магнитных свойств сильно коррелированных систем. Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Екатеринбург: Институт физики металлов им. М.Н. Михеева, 2019. 256 с.
6. *Jouda M., Torres Delgado S.M., Jouzdani M.A., Mager D., Korvink J.G.* // Magnetic Resonance. 2020. V. 1. № 1. P. 105.  
<https://doi.org/10.5194/mr-1-105-2020>
7. <https://www.bruker.com/de/products-and-solutions/mr/nmr/mr-microscopy-diffusion/probes/diffbb-old.html>
8. <http://www.teho.com/nmr-autotuning-system/>
9. <https://eprobe.tech/products/controller>
10. <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano>
11. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1132391/ETC1/28BYJ-48.html>
12. <https://qqtrading.com.my/td-8320mg-digital-high-torque-servo-motor-waterproof>
13. *Журенко С.В., Ткачёв А.В., Гунбин А.В., Гунпиус А.А.* // ПТЭ. 2021. № 3. С. 88.  
<https://doi.org/10.31857/S0032816221020257>
14. <https://www.ni.com/>

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,  
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 539.123

ПРИМЕНЕНИЕ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ  
ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ КООРДИНАТ  
И ОРИЕНТАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ ГЛУБОКОВОДНОГО  
НЕЙТРИННОГО ТЕЛЕСКОПА ВАКАЛ-GVD

© 2025 г. А. В. Аврорин<sup>a</sup>, А. Д. Аврорин<sup>a</sup>, В. М. Айнутдинов<sup>a</sup>, В. А. Аллахвердян<sup>b</sup>,  
З. Бардачова<sup>c, k</sup>, И. А. Белолоптиков<sup>b</sup>, Е. А. Бондарев<sup>a</sup>, И. В. Борина<sup>b</sup>, Н. М. Буднев<sup>d</sup>,  
А. Р. Гафаров<sup>d</sup>, К. В. Голубков<sup>a</sup>, Н. С. Горшков<sup>b</sup>, Т. И. Гресь<sup>d</sup>, Р. Дворниcki<sup>c, k</sup>,  
Ж.-А. М. Джилкибаев<sup>a</sup>, В. Я. Дик<sup>b, e</sup>, Г. В. Домогацкий<sup>a</sup>, А. А. Дорошенко<sup>a</sup>, А. Н. Дячок<sup>d</sup>,  
Т. В. Елзов<sup>b</sup>, Д. Н. Заборов<sup>a</sup>, С. И. Завьялов<sup>b</sup>, Д. Ю. Звездов<sup>b</sup>, В. К. Кебкал<sup>f</sup>, К. Г. Кебкал<sup>f</sup>,  
В. А. Кожин<sup>g</sup>, М. М. Колбин<sup>b</sup>, С. О. Колигаев<sup>l</sup>, К. В. Конищев<sup>b</sup>, А. В. Коробченко<sup>b</sup>,  
А. П. Кошечкин<sup>a</sup>, М. В. Круглов<sup>b</sup>, В. Ф. Кулепов<sup>h</sup>, А. А. Куликов<sup>d</sup>, Ю. Е. Лемешев<sup>d</sup>,  
Р. Р. Миргазов<sup>d</sup>, Д. В. Наумов<sup>b</sup>, А. С. Николаев<sup>g</sup>, Д. П. Петухов<sup>a, \*</sup>, И. А. Перевалова<sup>d</sup>,  
Е. Н. Плисковский<sup>b</sup>, М. И. Розанов<sup>i</sup>, Е. В. Рябов<sup>d</sup>, Г. Б. Сафронов<sup>a</sup>, А. Э. Сиренко<sup>b</sup>,  
А. В. Скурихин<sup>g</sup>, А. Г. Соловьев<sup>b</sup>, М. Н. Сороковиков<sup>b</sup>, А. П. Стромаков<sup>a</sup>, О. В. Суворова<sup>a</sup>,  
В. А. Таболенко<sup>d</sup>, В. И. Третьяк<sup>b</sup>, Б. Б. Ульзутуев<sup>b</sup>, В. Н. Фомин<sup>m</sup>, И. Харук<sup>a</sup>, Е. В. Храмов<sup>b</sup>,  
В. А. Чадымов, А. С. Чепурнов<sup>g</sup>, Б. А. Шайбонов<sup>b</sup>, Ф. Шимковиц<sup>c, k</sup>, Е. В. Широков<sup>g</sup>,  
В. Ю. Шишкин<sup>g</sup>, И. Штекл<sup>k</sup>, Э. Эцкерова<sup>c, k</sup>, Ю. В. Яблокова<sup>b</sup>

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

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

<sup>c</sup> Университет им. Я.А. Коменского в Братиславе  
Словакия, 81499, Братислава-1, Шафарикова пл., 6

<sup>d</sup> Иркутский государственный университет  
Россия, 664003, Иркутск, ул. Карла Маркса, 1

<sup>e</sup> Институт ядерной физики  
Казахстан, 050032, Алма-Ата, ул. Ибрагимова, 1

<sup>f</sup> Лаборатория гидроакустической телеметрии и навигации (ЛАТЕНА)  
Россия, 199106, Санкт-Петербург, ул. Детская, 5

<sup>g</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына  
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

<sup>h</sup> Нижегородский государственный технический университет  
Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24

<sup>i</sup> Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
Россия, 190121, Санкт-Петербург, Лоцманская улица, 3

<sup>k</sup> Чешский технический университет в Праге  
Чешская Республика, 16000, Прага 6 – Дейвице, ул. Югославских партизан, 1580/3

<sup>l</sup> Лаборатория прикладных информационных технологий “Инфрад”  
Россия, 141983, Дубна, Московская обл., ул. Программистов, 4

\* e-mail: kurpas@mail.ru

Поступила в редакцию 15.12.2024 г.

После доработки 26.01.2025 г.

Принята к публикации 13.02.2025 г.

Нейтринный телескоп нового поколения BAICAL-GVD находится в стадии развертывания в озере Байкал. Телескоп регистрирует черенковское излучение, возникающее в результате взаимодействия нейтрино с водной средой озера, с помощью пространственной структуры оптических модулей – фотодетекторов. Чтобы определить направление на источник нейтрино, необходимо знать координаты каждого модуля в момент регистрации события. В статье описывается конструкция, принцип работы инерциальной системы позиционирования, служащей для определения пространственного положения модулей в водной среде, представлены первые результаты ее функционирования.

DOI: 10.31857/S0032816225030129

### 1. ВВЕДЕНИЕ

BAICAL-GVD – это нейтринный телескоп нового поколения, который в настоящее время строится в озере Байкал. На данный момент это крупнейший детектор нейтрино в Северном полушарии, а его объем приближается к кубическому километру [1, 2]. Телескоп предназначен для измерения направления и энергии астрофизических нейтрино путем регистрации черенковского излучения вторичных частиц, образующихся при взаимодействии нейтрино с водой Байкала.

BAICAL-GVD состоит из отдельных светочувствительных элементов, называемых оптическими модулями (ОМ), которые располагаются в толще воды в виде упорядоченной пространственной решетки. Оптический модуль BAICAL-

GVD представляет собой фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) с диаметром фотокатода 10 дюймов, размещенный (вместе с необходимой электроникой) в прозрачном сферическом корпусе. ОМ установлены на гибких кабель-тросах, натянутых между якорем и подповерхностными буйами. На каждом кабеле установлено 3 секции по 12 ОМ – всего 36 ОМ с интервалом 15 м на глубинах от 1275 м до 750 м, которые составляют гирлянду. Восемь гирлянд (всего 288 ОМ) объединяются в кластер, состоящий из центральной гирлянды и семи периферийных гирлянд, размещенных в вершинах правильного семиугольника с радиусом 60 м (рис. 1).

Во время зимней экспедиции 2024 года начат монтаж 14-го кластера, сейчас общее число установленных оптических модулей составляет более 4000 (рис. 2).

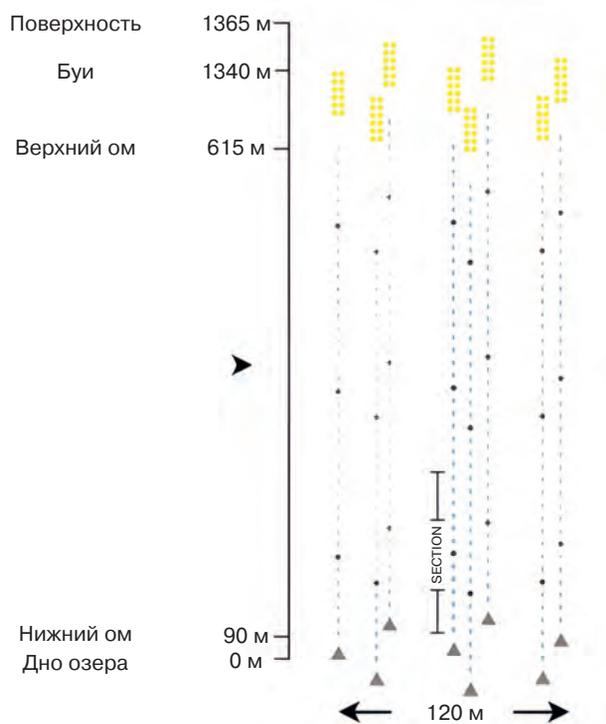


Рис. 1. Конфигурация кластера.

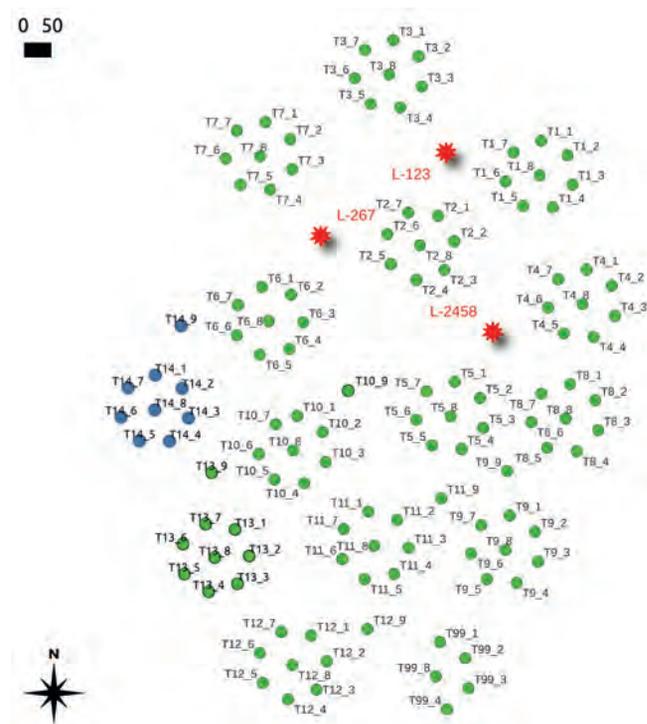


Рис. 2. Расположение кластеров.

## 2. ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ

Знание местоположения ОМ имеет важнейшее значение для реконструкции параметров событий (взаимодействий нейтрино), так как реконструкция направления прихода нейтрино прямо зависит от координат ОМ, а значит, ошибки в координатах ОМ ведут к ухудшению точности реконструкции направления на источник нейтрино. Из-за течений в озере Байкал геометрия гирлянд меняется со временем, и отдельные ОМ могут отклоняться от своих первоначальных положений на десятки метров. Дополнительную погрешность вносит изменение пространственной ориентации ОМ относительно несущего кабеля. Для решения этих проблем были разработаны две системы пространственного позиционирования: гидроакустическая система позиционирования и инерциальная система позиционирования.

## 3. ГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Гидроакустическая система позиционирования (Acoustic Positioning System, APS) представляет собой массив акустических модемов (АМ), установленных вдоль гирлянд согласно разметке, как показано на рис. 3. На каждой гирлянде может быть установлено до четырех модемов. Модемы, установленные около оптических модулей, называются маяками, их приемо-излучатели направлены вниз. Некоторые гирлянды имеют модемы, установленные рядом с якорем – это “донные маяки”, их приемо-излучатели направлены вверх, а координаты предполагаются постоянными и определяются с поверхности вскоре после установки всех гирлянд кластера.

Модемы обмениваются друг с другом сообщениями с помощью специального протокола D-MAC, позволяющего определить акустические дальности между маяками (времена распространения сигнала) с разрешением 1 мкс.

Во время работы телескопа и сбора данных APS функционирует автономно. Маяки гир-

лянды последовательно опрашиваются с берега для определения акустических расстояний до “донных маяков”. Эти данные и координаты “донных маяков” используются для трилатерации – восстановления координат маяков с точностью до нескольких сантиметров. Затем координаты ОМ интерполируются из положений маяков в предположении кусочно-линейной модели гирлянды.

После установки каждого нового кластера в APS добавляется не менее 32 АМ, включая четыре “донных маяка”. Это приводит к увеличению интервала опроса всей установки, что, в свою очередь, повышает неопределенность позиционирования.

При средней скорости маяка 0.5 см/с он может сместиться более чем на 3 м от предыдущего измерения, прежде чем будет завершено новое измерение.

Акустическая система позиционирования позволяет оценить координаты маяков с достаточно высокой точностью [3–5], однако при восстановлении координат оптических модулей используется упрощенная модель и никак не учитывается их ориентация относительно несущего кабель-троса.

## 4. ИНЕРЦИАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Инерциальная система позиционирования (Inertial Positioning System, IPS) разработана для обеспечения возможности оценки пространственной ориентации и координат оптических модулей нейтринного телескопа по показаниям датчиков пространственной ориентации (ДПО), установленных на плате контроллера ОМ. В состав ДПО входит трехосевой акселерометр и трехосевой датчик магнитного поля.

## 5. КАЛИБРОВКА IPS

Все датчики проходят процедуру калибровки. Для этого используется специальный стенд в виде сферы большого радиуса ( $d = 810$  мм, рис. 4), изготовленной из немагнитного матери-



Рис. 3. Расположение акустических маяков на гирлянде.



Рис. 4. Стенд калибровки в сборе (слева), полусфера стенда с ОМ (справа).

ала и состоящей из двух половинок для возможности установки в нее полностью собранного ОМ. Большая сфера вращается во всех плоскостях с помощью всенаправленных колес, установленных на базовой платформе. Такой метод вращения в естественных геофизических полях позволяет совместить процесс калибровки сразу двух датчиков после окончательной сборки оптического модуля.

Для повышения точности и избавления от отдельных выбросов в значениях для каждой оси датчика ускорений и для каждой оси датчика магнитного поля проводится фильтрация данных на заранее заданном интервале времени и учет калибровочных коэффициентов.

При дальнейших расчетах осуществляется переход к угловой системе координат. Для определения углов ориентации оптического модуля относительно нормальной системы координат используются три угла: курс, крен, дифферент (рис. 5). Ориентация отдельной секции гирлянды в угловой системе задается двумя величинами – азимут и угол отклонения от вертикали (рис. 6).

### 6. ПРИВЯЗКА IPS

Для привязки показаний ДПО к показаниям акустической системы позиционирования используется математическая модель, в которой дополнительно заданы три неизвестных угла (крен, дифферент, курс) – это углы ориентации ДПО относительно точки крепления оптического модуля на тросе гирлянды. Наличие измерений по трем взаимосвязанным углам (соответствующим двум независимым угловым параметрам) позволяет компенсировать погрешности установки платы контроллера и платы

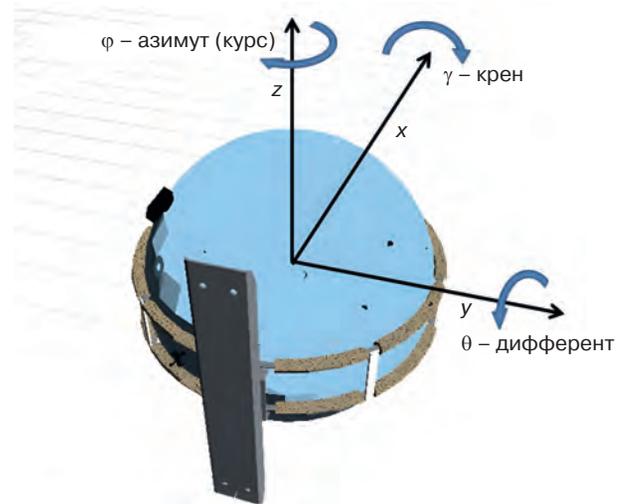


Рис. 5. Определение углов ориентации ОМ.

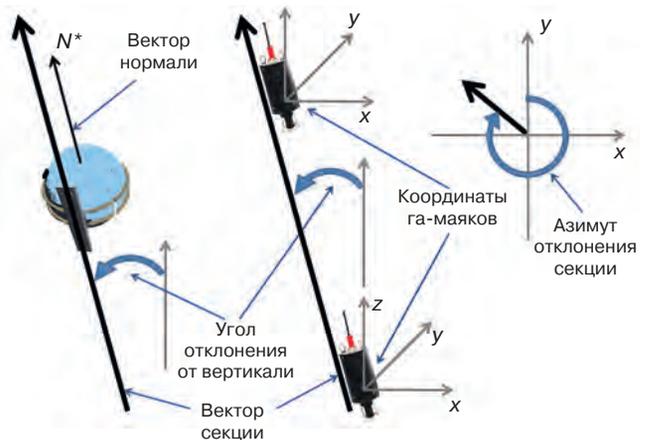


Рис. 6. Углы ориентации секции гирлянды.

ДПО внутри ОМ, погрешности установки ОМ в крепежной раме, погрешности установки рамы на кабеле гирлянды. Результат сравнения углов ориентации отдельной секции, полученных по APS и IPS после привязки, приведен на рис. 7. Результаты акустических измерений отображаются темным оттенком, тонкой линией с малым разбросом, но большим интервалом обновления. Данные инерциальной системы имеют больший статистический разброс, но меньший интервал обновления и отображаются более светлым графиком.

### 7. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ

После привязки показаний ДПО оптических модулей к показаниям акустической системы инерциальная система может работать авто-



Рис. 7. Углы ориентации (отклонение от вертикали и азимут) секции по APS и IPS.

номно. Вектор нормали ОМ по ДПО принимается за вектор ориентации участка кабеля, длина вектора равна расстоянию между оптическими модулями на гирлянде (измеряется при постановке и составляет 15 м). Геометрия гирлянды

и координата каждого ОМ рассчитывается от фиксированной координаты якоря последовательным суммированием векторов. Результат восстановления геометрии гирлянды инерциальной системой представлен на рис. 8. Геометрия отображена в плоскости наклона, отклонение гирлянды от вертикального положения в районе расположения верхнего оптического модуля достигает 40 м.

На рис. 9 схематично представлена “гидродинамическая модель” всей гирлянды в момент

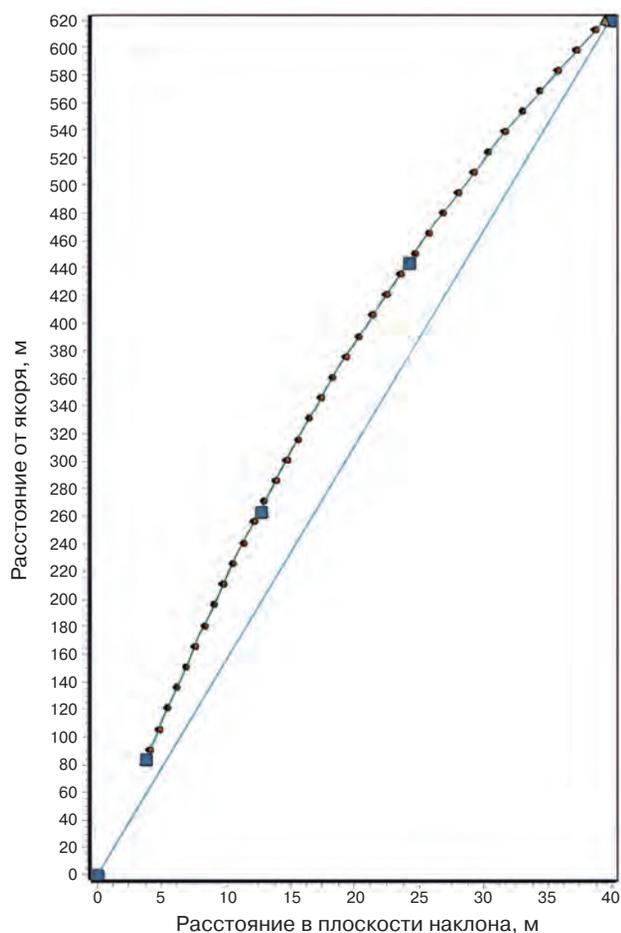


Рис. 8. Геометрия гирлянды, восстановленная по ДПО.

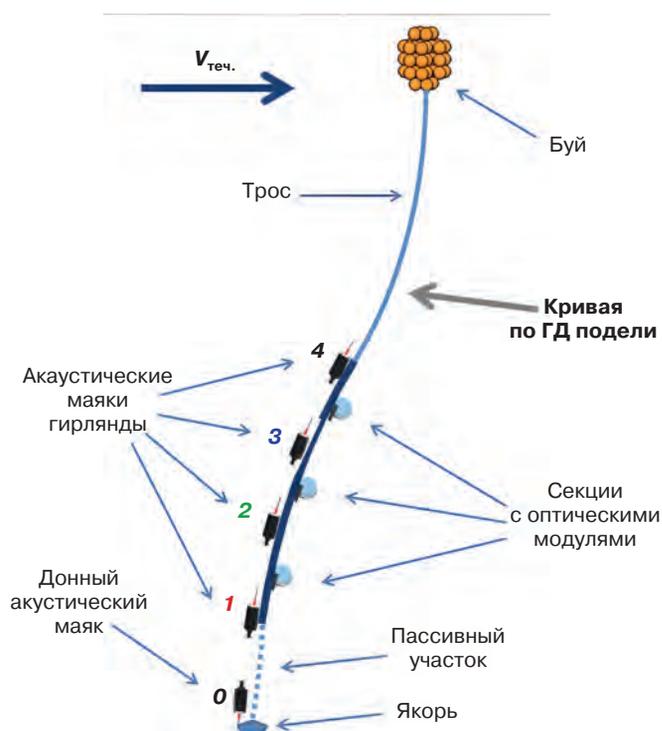


Рис. 9. Геометрия гирлянды в момент наклона, полученная по модели.

наклона. Модель учитывает массогабаритные характеристики всех элементов. На схеме присутствует участок с изгибом “вверх”, обусловленный положительной плавучестью, которой обладают оптические модули. В верхней части гирлянды изгиб “вниз” обусловлен отрицательной плавучестью троса.

### 8. АППРОКСИМАЦИЯ

Полученные в результате восстановления кусочно-линейным методом геометрии на примере данных 2017 года характеризуются тем, что отклонение оптических модулей от плоскости наклона мало, это дает возможность провести

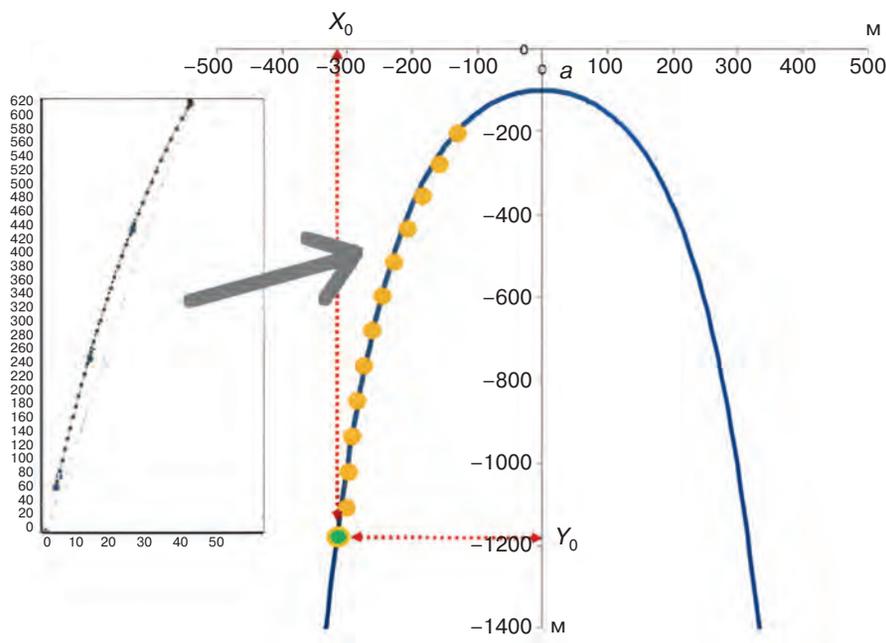


Рис. 10. Аппроксимация геометрии перевернутой цепной линии. Участок геометрии восстановленной по ДПО (слева), участок графика цепной линии (справа);  $X_0$ ,  $Y_0$  – начальные координаты для аппроксимации на кривой.

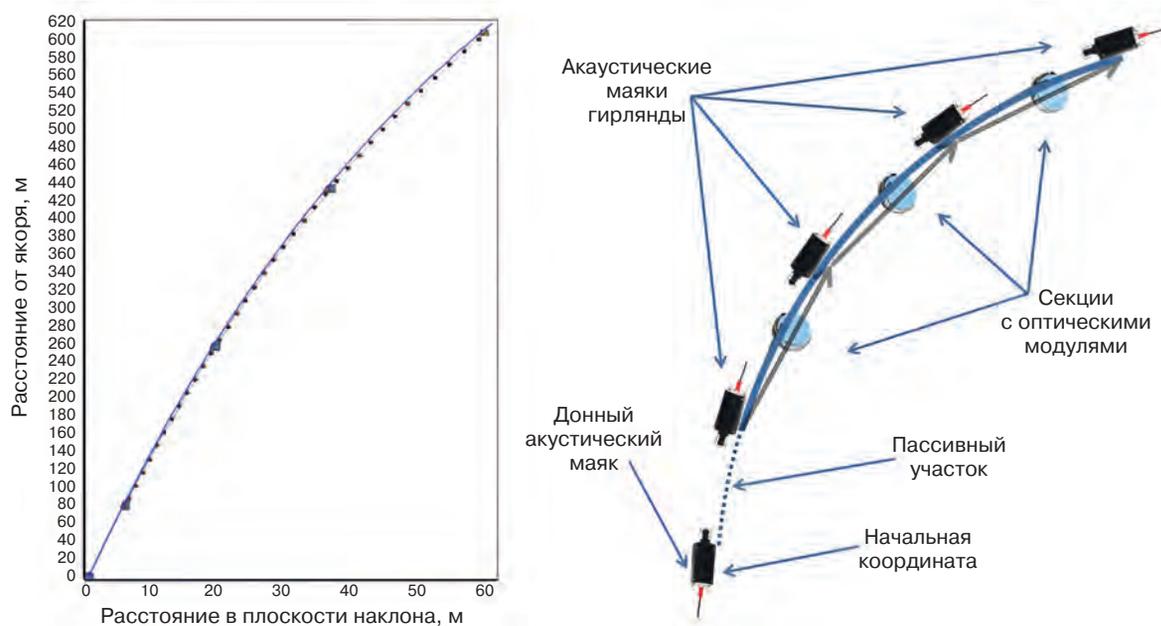


Рис. 11. Геометрия по ДПО и модельная кривая – синий график (слева), восстановление положения АМ и ОМ по модели (схема справа).

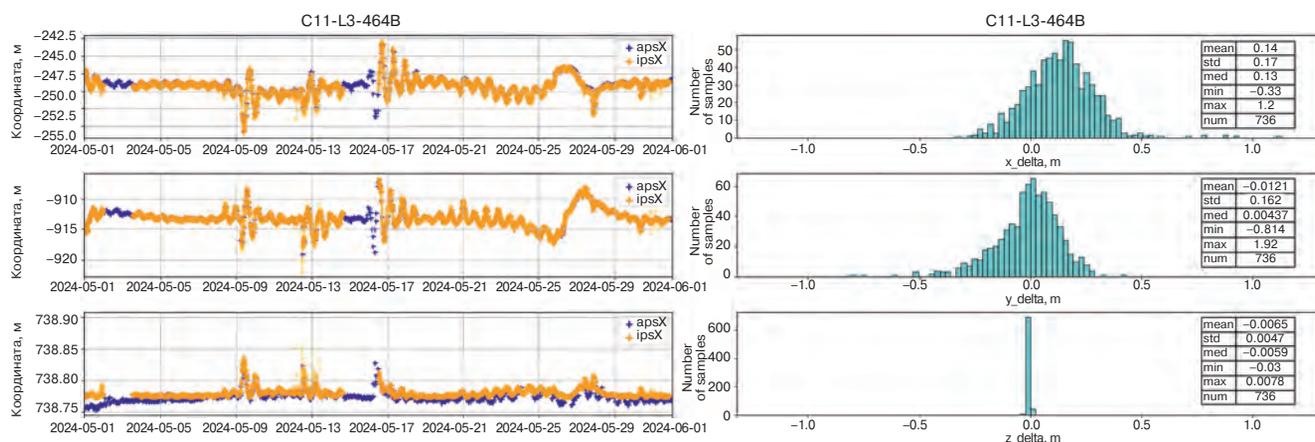


Рис. 12. Сравнение результата оценки координат по APS и IPS.

аппроксимацию координат гирлянды плоской кривой.

Анализ геометрий гирлянд подтвердил возможность аппроксимации геометрии различными математическими функциями (линейными, степенными, логарифмическими, полиномиальными), однако наиболее эффективной является аппроксимация уравнением цепной линии вида (рис. 10)

$$y = \frac{a}{2} \left( e^{\frac{x}{a}} + e^{-\frac{x}{a}} \right) = \operatorname{ach} \left( \frac{x}{a} \right).$$

Для расчетов был разработан алгоритм оценки параметров цепной линии, основанный на использовании углов наклона касательных в местах крепления оптических модулей к тросу. Координаты акустических маяков, как и других объектов на гирлянде, можно восстановить на модельной кривой, зная данные разметки при постановке (рис. 11).

Преимуществом алгоритма является принципиальная возможность оценки параметров аппроксимирующей функции с достаточной степенью точности по показаниям датчиков ориентации небольшого количества оптических модулей, вплоть до одного.

## 9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан эффективный алгоритм восстановления геометрии гирлянды и оценки координат и пространственной ориентации оптических модулей по показаниям датчиков пространственной ориентации после их привязки к показаниям акустической системы позициониро-

вания. Результат сравнения по отдельным осям представлен на рис. 12. Слева отображены координаты, полученные от акустической системы (синие графики) и инерциальной системы (оранжевый график). Справа – распределения ошибок по каждой оси. Средняя дисперсия ошибки восстановления координат верхнего маяка гирлянды в плоскости  $xu$  не превышает 20 см.

Инерциальная система позиционирования показывает высокую точность восстановления геометрии гирлянды при возможности получения результата с интервалом времени 1–2 мин, что существенно меньше аналогичного интервала акустической системы позиционирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках программы финансирования крупных научных проектов национального проекта “Наука” (грант № 075-15-2024-541).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baikal-GVD.  
<https://baikalgvd.jinr.ru>
2. *Baikal-GVD Collaboration: Allakhverdyan V.A. et al.* // Phys. At. Nucl. 2021. V. 84. P. 1600.  
<https://doi.org/10.1134/S1063778821090064>
3. *Baikal-GVD Collaboration: Avrorin A.D. et al.* // PoS(ICRC2019)1012. 2019.  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.05529>
5. *Riccobene G.* // EPJ Web of Conferences, EDP Sciences. 2019. V. 207. P. 07005.  
<http://doi.org/10.1051/epjconf/201920707005>
6. *Коллегаев С.О., Коллегаев О.А.* // Геоинформатика. 2010. № 4. С. 23.

УДК 543.275

## ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА СЛАБОПОГЛОЩАЮЩИХ КАПЕЛЬ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ ПОТОКАХ

© 2025 г. А. Е. Варфоломеев<sup>а,\*</sup>, В. В. Пименов<sup>а,\*\*</sup>, А. А. Сабельников<sup>а</sup>, Е. В. Черненко<sup>а</sup>,  
А. О. Александров<sup>а</sup>, Н. П. Зарецкий<sup>а</sup>

<sup>а</sup> *Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”  
Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1*

\* *e-mail: Varfolomeev\_AE@nrcki.ru*

\*\* *e-mail: Pimenov\_VV@nrcki.ru*

Поступила в редакцию 17.07.2024 г.

После доработки 25.02.2025 г.

Принята к публикации 03.03.2025 г.

Предложен простой бесконтактный оптический способ измерения основных параметров слабопоглощающих капель в нестационарных аэрозольных потоках с малым временным разрешением. Он позволяет измерять одновременно размеры капель, их скорости и концентрацию в зависимости от времени.

DOI: 10.31857/S0032816225030131

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Бесконтактные методы измерения различных параметров нестационарных аэрозольных потоков требуются для диагностики параметров взрывоопасных аэрозольных облаков в аварийных ситуациях на объектах топливно-энергетического комплекса, а также в различных областях науки и промышленности, экологии. В настоящее время известно несколько бесконтактных оптических методов определения различных параметров дисперсной фазы в аэрозольных потоках. Например, для измерения скоростей используются методы цифровой трассерной визуализации частиц (Particle Image Velocimetry, PIV) и лазерной доплеровской анемометрии, для определения размеров частиц дисперсной фазы — дифракционные методы [1–5].

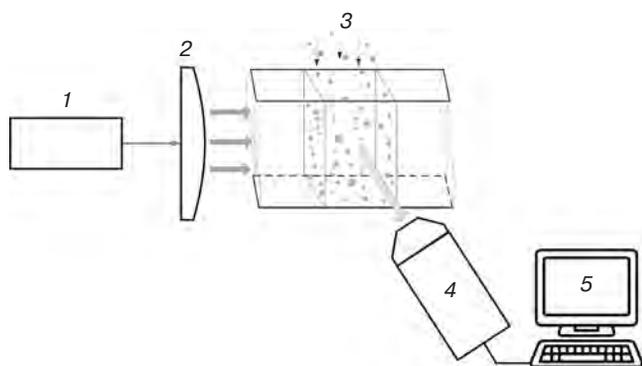
Однако устройства на основе этих методов имеют достаточно сложную конструкцию, используют дорогие скоростные видеокамеры, лазеры и другое оборудование, позволяют измерять только один-два параметра, их применение в полевых условиях невозможно или ограничено. В полевых условиях желательно одновре-

менно измерять сразу несколько параметров аэрозольного потока в зависимости от времени, особенно для нестационарных аэрозольных потоков. При этом желательно использовать сравнительно недорогие и простые в эксплуатации приборы и устройства.

В нашей статье предложен бесконтактный оптический способ, который позволяет проводить диагностику с малым временным разрешением параметров слабопоглощающих капель в нестационарных аэрозольных потоках с одновременным определением скоростей, размеров и концентрации капель в зависимости от времени [6].

### 2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Принципиальная схема установки показана на рис. 1, она включает в себя маломощный полупроводниковый лазер 1, систему линз 2, поток аэрозоля 3 и цифровой видеомикроскоп 4. Сбор, обработка данных и визуализация результатов измерений проводятся с помощью компьютера 5 и специальной программы. Излучение маломощного полупроводникового лазера 1, работающего в импульсно-периодическом режиме, проходит



**Рис. 1.** Принципиальная схема установки: 1 – полупроводниковый лазер; 2 – линзы; 3 – поток аэрозоля; 4 – цифровой видеомикроскоп; 5 – компьютер.

через систему линз 2, которая формирует световую плоскость (конфигурация “световой нож”), пересечение которой с областью аэрозольного потока 3 и глубиной резко изображаемого пространства видеомикроскопа 4 формирует детектируемый объем необходимого размера в аэрозольном потоке. Цифровой видеомикроскоп расположен под определенным углом к световой плоскости. Капли аэрозоля пролетают в области детектируемого объема и детектируются видеомикроскопом с определенной частотой следования кадров.

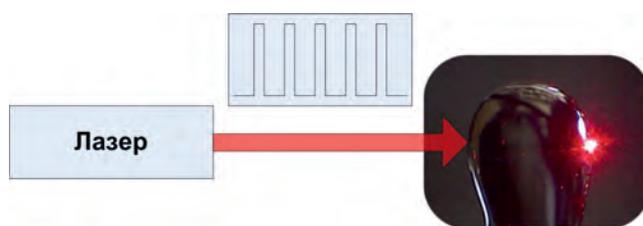
При достаточно больших размерах капель в приближении геометрической оптики излучение лазера фокусируется каплей как шаровой линзой (рис. 2). Эффективное фокусное расстояние шаровой линзы  $F$  и расстояние  $X$  между задней поверхностью шара и фокусом определяются формулами

$$F \approx \frac{nD}{4(n-1)},$$

$$\frac{X}{D} \approx \frac{1}{4} \left( \frac{1}{n-1} - 1 \right),$$

где  $D$  – диаметр капли,  $n$  – показатель преломления. При  $n = 2$  излучение фокусируется непосредственно на поверхности капли. При  $n < 2$  излучение лазера фокусируется вне капли вблизи поверхности и за счет малого диаметра сфокусированного лазерного пучка на задней поверхности капли образуется яркое светящееся пятно.

В качестве примера на рис. 2 приведена фотография реальной капли воды со светящейся точкой на ее поверхности за счет фокусировки лазерного излучения. В данном случае капля воды для лучшей видимости была дополнительно подсвечена слабым внешним источником света. Цифровой видеомикроскоп регистри-



**Рис. 2.** Фотография фокусного пятна лазерного излучения на поверхности капли при фокусировке лазерного излучения каплей воды.

рует изображения светящихся фокусных точек на каплях, при этом изображения самих капель на кадрах не наблюдаются, так как при малой мощности излучения интенсивность рассеянного и отраженного от поверхности капель света слишком слабая и этот свет не детектируется видеомикроскопом.

На матрице видеомикроскопа яркое светящееся пятно на поверхности капли отображается в виде точки размером несколько пикселей матрицы. Заметим, что угол наблюдения в принципе можно изменять в достаточно широких пределах, исключая при этом прямое попадание излучения лазера, вплоть до  $90^\circ$  в зависимости от чувствительности видеокамеры и желаемого динамического диапазона яркостей.

В установке использовался дешевый диодный лазер с длиной волны 650 нм и средней мощностью около 0.7 мВт, работающий в импульсно-периодическом режиме с длительностью импульса 10 мкс и периодом 70 мкс. При этом на кадре видеомикроскопа из-за малой длительности импульсов лазера каждая пролетевшая капля детектируется в виде прерывистого трека, состоящего из отдельных ярких точек, которые соответствуют импульсам лазера.

На рис. 3 приведен пример зарегистрированных треков в виде ярких точек от пролетевших капель воды в течение одного кадра видеомикроскопа, а также распределение яркости пикселей матрицы вдоль одного трека. Регистрация треков пролетевших капель проводилась цифровым видеомикроскопом Miview MV200UM с 8-битовой градацией яркости при скорости съемки 15 кадров в секунду, соединенным с компьютером через USB-разъем.

Величина яркости точки на треке в видеокадре определяется сфокусированным излучением, которое прошло через сечение капли в течение одного импульса лазера и однозначно зависит от размера капли, что позволяет определять диаметры капель по яркости точек. Заме-

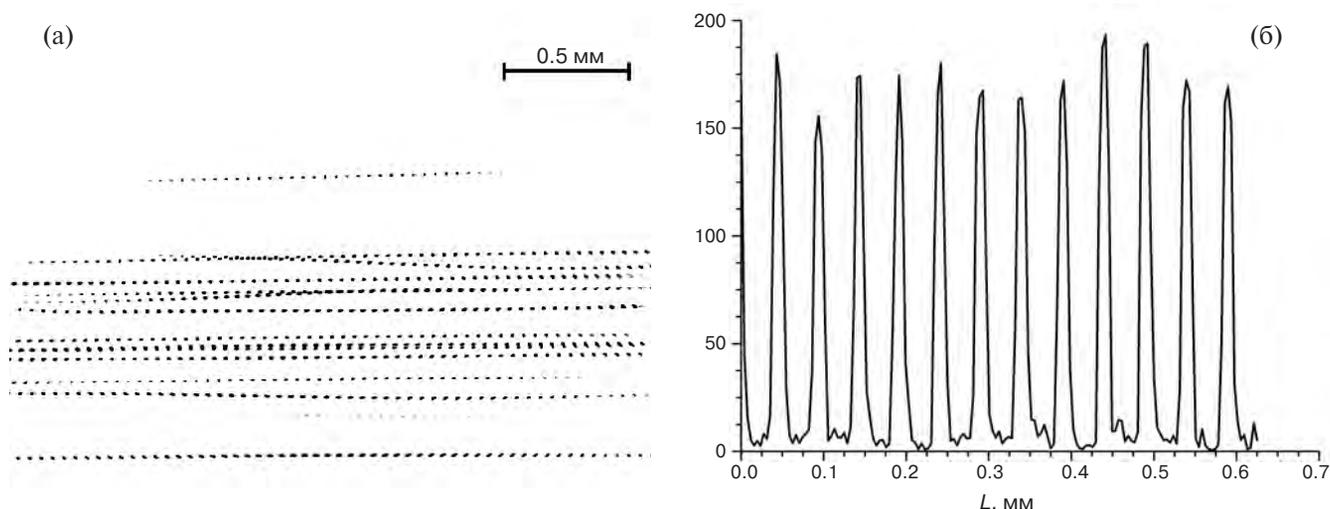


Рис. 3. Пример видеокadra длительностью 1/15 с с треками в виде ярких точек от пролетевших капель воды в импульсном аэрозольном потоке (а), распределение яркости пикселей вдоль трека (б).

тим, что фокусировка излучения капель зависит от коэффициента преломления среды в каплях и, соответственно, каждый раз желательна предварительная калибровка на соответствующих аэрозолях во всем измеряемом диапазоне размеров капель.

Аэрозоли для калибровки были получены путем использования набора различных источников — как аэрозольных распылителей, так и сопел разного диаметра. Аэрозоли осаждались на подложку, изображения капель обрабатывались в программе ImageJ с учетом поправок, и строились гистограммы размеров капель для каждого источника.

Для определения размеров капель на подложке использовались микроскоп и стандартная процедура, которая принимала во внимание поправочный коэффициент с учетом угла смачивания жидкости на подложке [7]. В качестве подложки использовалась гидрофобная полимерная пленка с известным углом смачивания, например тефлоновая.

Для каждого источника аэрозоля после осаждения капель на подложку с помощью микроскопа и стандартной процедуры определялись размеры капель с учетом поправочного коэффициента и угла смачивания, строились гистограмма и функция распределения капель по размерам. Полученная гистограмма сопоставлялась с гистограммой и функцией распределения яркости капель, полученной на установке. Сопоставив обе функции распределения для каждого из источников аэрозоля с разным размером капель, мы получили калибровочные

зависимости яркости точек от диаметра капель для различных жидкостей.

На рис. 4 приведен пример гистограммы размера капель воды, полученной для импульсного аэрозольного потока длительностью 0.8 с, и соответствующее подогнанное логнормальное распределение диаметров капель. Заметим, что путем обработки отдельных кадров можно регистрировать изменение размеров капель в нестационарном потоке в зависимости от времени.

Расстояние между точками в треках определяется скоростью пролетевших капель и периодом следования импульсов лазера, что позволяет определять скорость каждой пролетевшей капли в аэрозольном потоке. Скорости капель вычис-

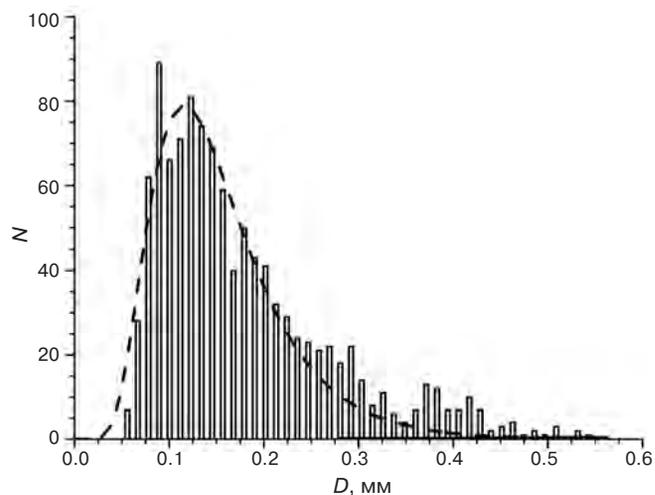


Рис. 4. Гистограмма диаметров капель воды  $D$  в импульсном аэрозольном потоке длительностью 0.8 с и соответствующее логнормальное распределение.

ляются для каждого трека из периода  $T$  лазерных импульсов, масштаба изображения  $M$  на кадре видеомикроскопа и расстояния  $L$  между точками в треке:

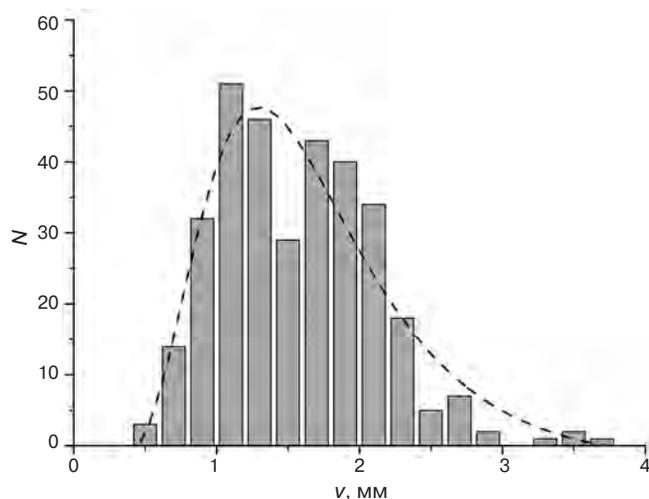
$$v = ML/T.$$

На рис. 5 приведены пример полученной гистограммы скоростей капель воды в импульсном аэрозольном потоке длительностью 0.8 с и соответствующее логнормальное распределение. Заметим, что таким образом определяются только проекции скоростей на плоскость, нормальную к линии зрения видеомикроскопа. При значительном угле наблюдения в расчет скоростей необходимо вносить поправку.

Концентрацию капель  $K$  в аэрозольном потоке определяют по известным геометрическим размерам области детектирования, скорости, числу пролетевших капель и времени экспозиции одного кадра согласно выражению

$$K = N/vSt,$$

где  $N$  – число капель, пролетевших через область детектирования за время одного кадра, которое равно числу треков на кадре,  $v$  – скорость потока,  $S$  – площадь области детектирования,  $t$  – длительность одного кадра. На рис. 6 приведен пример полученной концентрации капель воды в зависимости от времени для импульсного аэрозольного потока. Концентрация капель определялась для каждого кадра с учетом следующих параметров: площадь сечения детектируемой области  $S = 70 \text{ мм}^2$ , средняя скорость капель в потоке  $v = 1.5 \text{ м/с}$ .

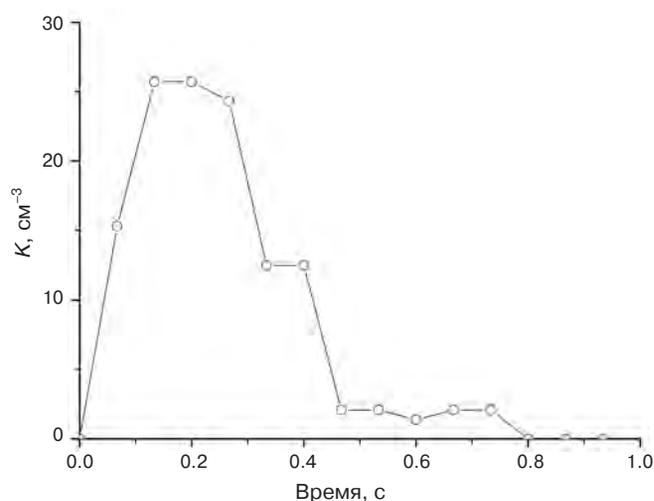


**Рис. 5.** Гистограмма скоростей капель  $v$  в импульсном аэрозольном потоке и соответствующее логнормальное распределение.

Заметим, что предлагаемый способ, по нашему мнению, может быть пригоден в широкой области, и его преимуществом является то, что параметры оптической схемы можно изменять, тем самым адаптируя установку на основе данного способа к требуемым условиям (нужным размерам детектируемого объема, диапазону скоростей, коэффициенту увеличения оптической системы, видеокамере и др.).

Кадры видеомикроскопа с изображениями треков передаются на компьютер с последующей обработкой с помощью специально разработанной программы. Программа определяет максимальные значения яркости точек и вычисляет размеры капель с учетом соответствующей нелинейной калибровочной зависимости и нелинейности отклика матрицы видеомикроскопа. Программа находит также интервалы между точками для разных треков, количество зарегистрированных треков в единице объема за единицу времени, вычисляет скорости капель, строит соответствующие гистограммы по размерам и скоростям, вычисляет концентрацию капель.

По полученным гистограммам скоростей и размеров частиц можно определить и соответствующие функции распределения. Обработка данных и построение соответствующих гистограмм могут проводиться как по всем кадрам, так и для каждого кадра видеомикроскопа по отдельности. Тем самым обеспечивается возможность измерения необходимых параметров нестационарного аэрозольного потока в зависимости от времени. Воспроизводимость резуль-



**Рис. 6.** Зависимость концентрации капель  $K$  от времени  $t$  для импульсного аэрозольного потока капель воды.

татов проверяли при разных скоростях аэрозольных потоков и температурах, а также на аэрозолях различных жидкостей.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан простой и дешевый бесконтактный оптический способ измерения одновременно нескольких параметров слабопоглощающих капель в нестационарных аэрозольных потоках с малым временным разрешением. Способ позволяет измерять гистограммы размеров и скоростей капель в зависимости от времени, а также их концентрацию в небольшом объеме в импульсных аэрозольных потоках в полевых условиях.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ “Курчатовский институт”.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Raffel M., Willert C.E., Wereley S.T., Kompenhans J.* Particle Imaging Velocimetry. Berlin: Springer-Verlag, 2001.
2. *Zamboni R., Zaltron A., Chauvet M., Sada C.* // Sci. Rep. 2021. V. 11. P. 17987. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97392-3>
3. *Наумов И.В., Меледин В.Г.* РФ Патент 2523737RU, 2014.
4. Определение размеров частиц по дифракции лазерного излучения. ГОСТ Р 8.777-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Дисперсный состав аэрозолей и взвесей.
5. *Дроков В.Г., Дроков В.В., Скудаев Ю.Д., Яковлев В.А.* РФ Патент 2569926RU, 2015.
6. *Варфоломеев А.Е., Сабельников А.А., Пименов В.В., Черненко Е.В.* РФ Патент 2812314RU, 2024.
7. *Матюхин С.И., Фроленков К.Ю.* // Конденсированные среды и межфазные границы. 2013. Т. 15. № 3. С. 292.

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ УСТАНОВКА ИМПУЛЬСНОГО НАГРЕВА ПРОВОЛОЧНОГО ЗОНДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕРМИЧЕСКИ НЕСТАБИЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ

© 2025 г. А. Н. Котов<sup>а</sup>\*, Н. С. Богатищева<sup>а</sup>, Г. В. Панов<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук  
Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а

\* e-mail: artem625@mail.ru

Поступила в редакцию 21.10.2024 г.

После доработки 22.01.2025 г.

Принята к публикации 17.03.2025 г.

Разработана цифровая измерительная система в составе экспериментальной установки для определения критической температуры и критического давления термически нестабильных веществ, позволяющая проводить автоматизированную обработку данных в ходе проведения эксперимента.

DOI: 10.31857/S0032816225030146

### 1. МЕТОД И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка применяется для измерения температуры достижимого перегрева и критических параметров жидких неэлектропроводных сред, для которых время нахождения при высокой температуре ограничено. На фазовой диаграмме исследуемого вещества критическая точка является общей вершиной бинодали, спинодали и линии достижимого перегрева (рис. 1). Положение критической точки на фазовой диаграмме определяется величинами критической температуры и давления. Метод состоит в измерении температуры достижимого перегрева исследуемого образца в зависимости от давления с помощью платинового зонда, погруженного в исследуемую жидкость [1]. Особенности используемого метода импульсного изобарического нагрева проволочного зонда являются быстрый разогрев и сверхмалое разложение исследуемого вещества в процессе измерения [2].

На рис. 2а показана зависимость температуры зонда от времени в процессе нагрева импульсом тока. Температурное возмущение  $\Theta$  возникает вследствие резкого изменения теплообмена нагревателя с жидкостью в момент

вскипания образца вблизи зонда. Амплитуда температурного возмущения зависит от химической природы вещества, давления в камере и длительности импульсов. С приближением давления к критическому интенсивность вскипания уменьшается и амплитуда сигнала вскипания падает. Характерная зависимость амплитуды температурного возмущения от давления для *n*-гептана приведена на рис. 2б. Давление

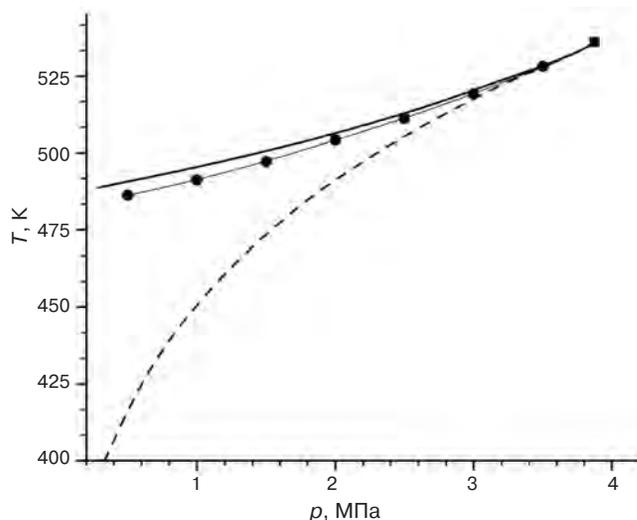


Рис. 1. Фазовая диаграмма диметилового эфира этиленгликоля.

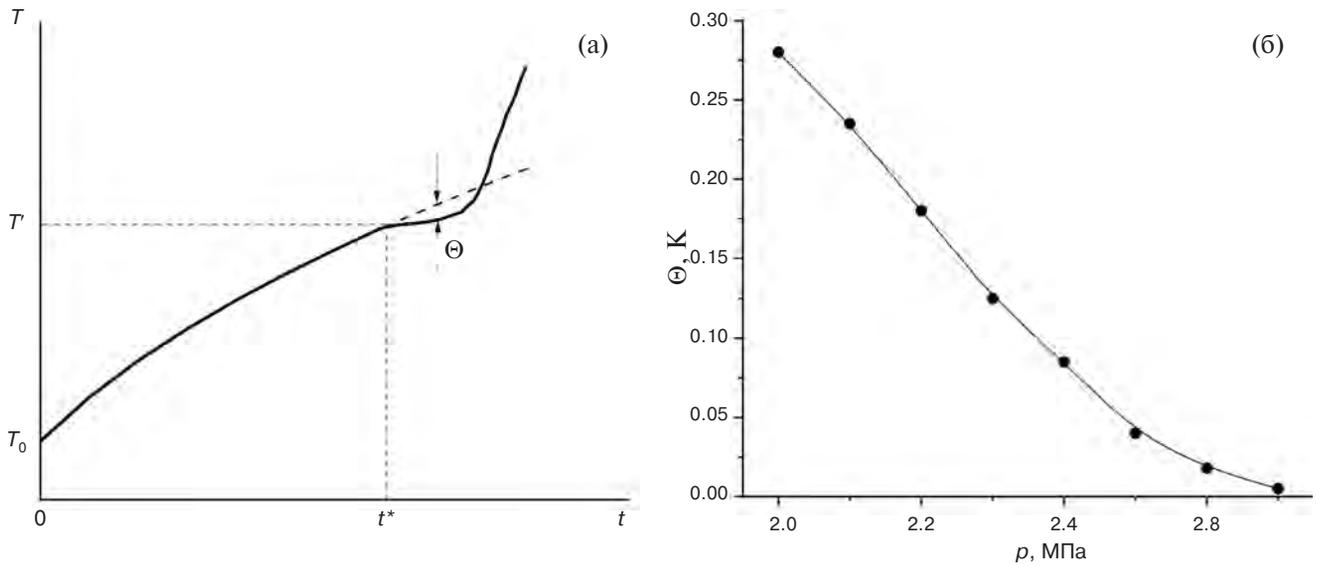


Рис. 2. а – Зависимость температуры зонда от времени, б – амплитуда возмущения температуры зонда в зависимости от давления для *n*-гептана.

в камере повышается до тех пор, пока амплитуда температурного возмущения не уменьшится до уровня, не позволяющего его выделение на фоне шумов. Это давление принимается равным измеренному значению критического давления, а температура достижимого перегрева при этом давлении – измеренному значению критической температуры.

В качестве зонда используется малоинерционная тонкая платиновая проволока диаметром 20 мкм и длиной от 10 до 30 мм, работающая как нагреватель и измеритель температуры [3]. Блок-схема экспериментальной установки показана на рис. 3.

Измерительная ячейка выполнена в виде металлического цилиндра, внутри которого

установлен фторопластовый стакан с исследуемым образцом. Полость между ячейкой и стаканом заполнена гидравлической жидкостью, давление в ней изменяется при помощи блока регулировки давления, состоящего из поршневого насоса и манометра. Блок регулировки температуры обеспечивает изменение начальной температуры в объеме жидкости. Проволочный зонд устанавливается внутри фторопластового стакана и непосредственно контактирует с измеряемой жидкостью. Нагрев зонда проводится короткими импульсами тока амплитудой до 25 А с регулируемой длительностью в диапазоне 10–1000 мкс. Блок генератора импульсов обеспечивает периодическую подачу импульсов тока нагрева, а также сигнал синхронизации для

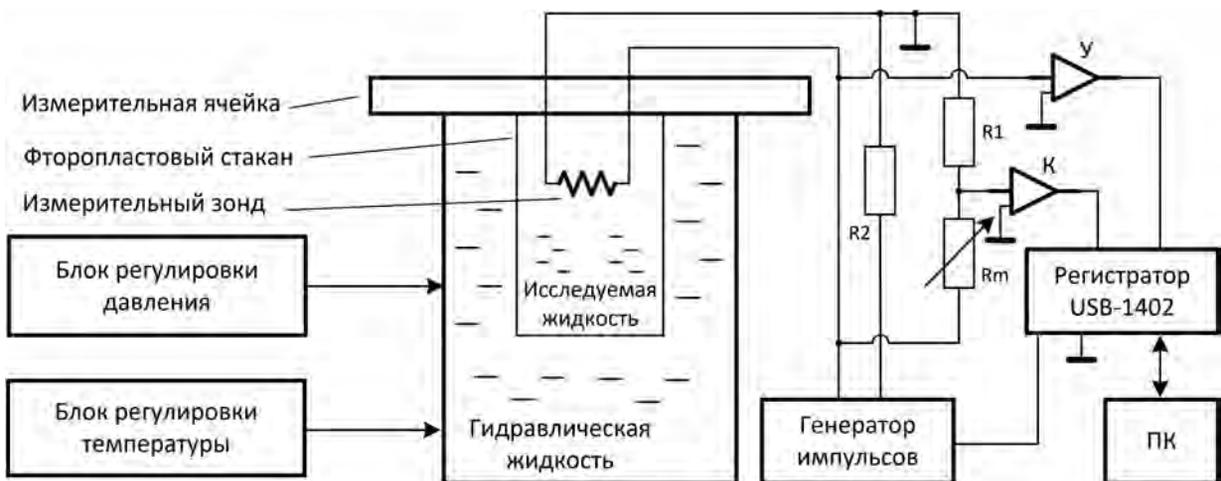


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: У – дифференцирующий усилитель, К – компаратор, ПК – персональный компьютер.

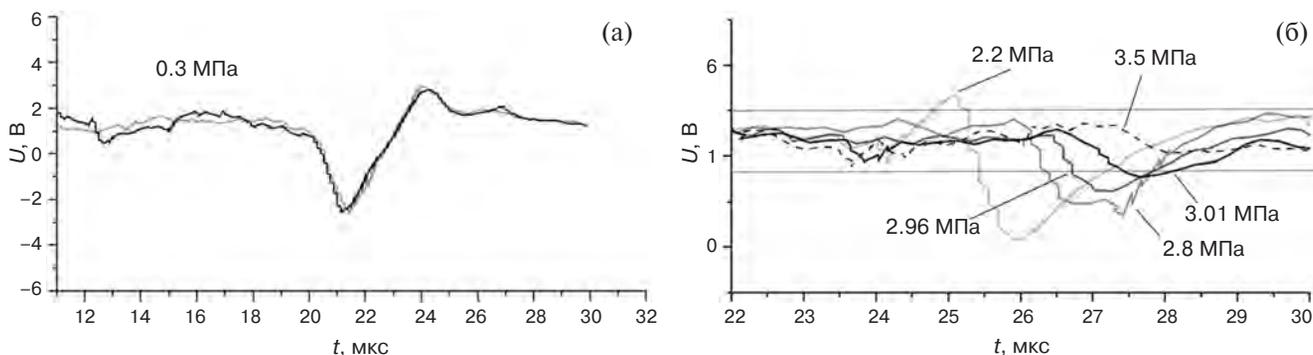
измерительной системы. Зонд включен в мостовую электрическую схему на малоиндуктивных сопротивлениях  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_m$ . Путем выбора значения сопротивления  $R_m$  мост балансируется на сопротивление зонда, соответствующее заданной температуре нагрева. Напряжение диагонали моста подается на вход компаратора (К) для определения момента времени нагрева зонда до выбранной температуры. Дифференцирующий усилитель (У) выделяет переменную часть сигнала разогрева зонда. Сигналы выхода компаратора и усилителя поступают на аналоговые входы цифрового блока сбора данных – регистратора USB-1402. Регистратор содержит 2-канальный 14-битовый АЦП с частотой дискретизации 50 МГц, он обеспечивает передачу оцифрованных сигналов в память персонального компьютера (ПК) для обработки специализированным программным обеспечением (ПО).

## 2. АПРОБАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ В ОПЫТАХ С ОБРАЗЦОМ *n*-ГЕКСАНА

На рис. 4 показана серия температурных сигналов канала дифференцирующего усилителя У, полученных при импульсном нагреве зонда в образце *n*-гексана при разных давлениях. На рис. 4а при давлении 0.35 МПа наблюдается отчетливое возмущение, проявляющееся как нарушение монотонности нагрева и возникающее в момент вскипания образца на поверхности зонда. Временной интервал между возникновением возмущения и стартом процесса нагрева зонда определяется по количеству отсчетов в массиве данных АЦП. Шаг дискретизации АЦП в блоке USB-1402 составляет 20 нс. По мере

увеличения давления амплитуда сигнала вскипания снижается. В соответствии с методикой измерений давление в камере повышается до тех пор, пока амплитуда возмущения не уменьшится до уровня собственных шумов измерительной схемы. При фиксированном давлении возмущение характеризуется повторяемостью относительного изменения амплитуды и момента, соответствующего началу фазового перехода. Это позволяет в режиме периодического нагрева без изменения давления отделить случайные колебания амплитуды от систематических колебаний, связанных со вскипанием. Вскипание считается зафиксированным, если амплитуда возмущения превышает уровень шумовой полосы (выбранный пороговый уровень) измерительного канала в данных условиях опыта. Выбранный пороговый уровень является минимально возможным для надежной фиксации факта отсутствия вскипания, он определяет предел чувствительности установки. В экспериментах для обеспечения предельной точности измерения критических параметров шаг по давлению вблизи критической точки определяется классом точности манометра, он составлял 0.05 МПа.

Для выделения сигнала вскипания разработан алгоритм анализа, обрабатывающий данные непосредственно в ходе эксперимента. Оператор перед началом эксперимента настраивает параметры алгоритма и выбирает зону для автоматического определения сигнала вскипания. В ходе эксперимента нагрев зонда проводится в импульсно-периодическом режиме с постепенным увеличением давления в камере. Каждый новый результат нагрева, получения и обработки данных сопровождается индикацией в окне ПО сообщением оператору о наличии



**Рис. 4.** Температурные сигналы зонда при различных давлениях, выноской указано давление, при котором получен соответствующий сигнал: **а** – два измерения при давлении 0.3 МПа; **б** – серия измерений вблизи критического давления: пороговые уровни определения вскипания отмечены горизонтальными линиями, сигнал, соответствующий закритическому давлению, выделен штриховой линией.

или отсутствию сигнала вскипания. Индикация отсутствия сигнала вскипания используется оператором для определения значения критического давления в ходе эксперимента. На рис. 4б можно видеть эволюцию сигнала вскипания с повышением давления. При давлениях не выше 3.01 МПа сигнал пересекает пороговые уровни напряжений, что является критерием определения факта вскипания. При давлениях выше критического (3.5 МПа) сигнал вскипания не фиксируется. В закритической области отсутствие характерного для вскипания сигнала дополнительно проверяется проведением серии опытов с фиксированным давлением.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате применения цифрового регистратора USB-1402 с АЦП высокой разрядности и низким уровнем собственных шумов позволило улучшить качество температурного сигнала зонда, разработанный алгоритм обработки данных дал

возможность скорректировать методику измерений и снизить общую погрешность измерения.

Установка позволяет проводить измерения с проволочными зондами в диапазонах сопротивлений 1–8 Ом, температур зонда 350–1300 К и тока нагрева 1–25 А при давлениях 0–35 МПа и длительности импульсов тока от 10 мкс до 1 мс.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00723, <https://rscf.ru/project/23-29-00723/>

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Скрипов В.П.* Метастабильная жидкость. Москва: Наука, 1972.
2. *Nikitin E.D., Pavlov P.A., Skripov P.V.* // J. Chem. Thermodyn. 1993. V. 25. P. 869. <https://doi.org/10.1006/jcht.1993.1084>
3. *Котов А.Н., Лукьянов К.В., Сафонов В.Н., Старостин А.А., Шангин В.В.* // ПТЭ. 2020. № 6. С. 133. <https://doi.org/10.31857/S0032816220060117>

## МИНИМИЗАЦИЯ ПРОБЛЕМ ПРИ СОЗДАНИИ ДВУХФАЗНЫХ РАСХОДОМЕРОВ ДЛЯ КРИОГЕНИКИ И ИХ ОСОБЕННОСТИ. ЧАСТЬ I. ДИАГНОСТИКА ПОТОКОВ ГЕЛИЯ

© 2025 г. Ю. П. Филиппов<sup>a, \*</sup>, А. М. Коврижных<sup>a</sup>, А. Ю. Филиппов<sup>b, \*\*</sup>

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

<sup>b</sup> ГлоуБайт / GlowByte  
Россия, 105064, Москва, Нижний Сусальный переулок, 5, с. 19

\* e-mail: fyp@dubna.ru

\*\* e-mail: forsc2231@gmail.com

Поступила в редакцию 12.09.2024 г.

После доработки 09.01.2024 г.

Принята к публикации 20.02.2025 г.

Предложены пути создания двухфазных расходомеров гелия в диапазоне массовых расходов от примерно 5–6 до более чем 1000 г/с. Принцип работы расходомеров основан на комбинации емкостных датчиков паросодержания с равномерным электрическим полем внутри чувствительных элементов для определения средней плотности двухфазной смеси и конических сужающих устройств для нахождения средней скорости потока. При этом могут использоваться емкостные датчики с чувствительными элементами как кругового, так и кольцевого поперечных сечений, существенно различающиеся чувствительностью. Рассмотрены особенности и проблемы, свойственные двухфазным расходомерам такого типа, к которым относится, прежде всего, влияние разнообразия режимов течения на характеристики сужающего устройства. Другая проблема состоит в учете влияния структуры двухфазного потока на определение его средней плотности. Еще одна проблема связана с возможными различиями между измеренными величинами перепадов давления в сужающем устройстве и ожидаемыми значениями, которые оценены посредством гомогенной модели в одном из предельных случаев течения двухфазных потоков. Показаны способы минимизации этих проблем посредством сочетания отдельных технических решений, которые уже проверены на практике. Представлены конкретные технические варианты двухфазных расходомеров гелия, в том числе проточный горизонтальный криостат, которые работоспособны во всем диапазоне истинных объемных паросодержаний от 0 до 1 при относительно небольшом общем гидравлическом сопротивлении проточной части расходомера. Показаны различия новых и предыдущих технических решений. Оценены неопределенности нахождения расхода двухфазных потоков гелия.

DOI: 10.31857/S0032816225030151

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Попытки создания двухфазных расходомеров для криогеники разного назначения различными способами предпринимались неоднократно [1–5]. Двухфазные гелиевые расходомеры могут применяться в системах мониторинга сверхпроводящих ускорителей частиц, криоста-

тируемых с изменением агрегатного состояния жидкого гелия [6, 7], в системах производства, хранения, транспортировки и распределения жидкого гелия на крупных заводах по переработке природного газа, служащего сырьем для производства гелия. Двухфазные расходомеры также могут быть полезны в системах заправки ракетносителей жидкими водородом или мета-

ном и жидким кислородом, а также в системах производства, хранения, транспортировки и распределения сжиженного природного газа (СПГ) [2, 5].

Не претендуя на полноту обзора, рассмотрим некоторые из этих расходомеров с позиций таких принципиальных требований, как высокая надежность, возможность работы преимущественно во всем диапазоне паросодержаний, приемлемая точность измерения, относительно небольшое полное гидравлическое сопротивление и реализуемость доступных для практики метрологических процедур с минимальными затратами. В этой части работы основное внимание будет уделено гелиевым системам диагностики двухфазных потоков.

Процессы охлаждения гелиевых систем до рабочей температуры и их отогрева до температуры окружающей среды довольно длительны, и не всегда есть возможность сравнительно быстрой замены нужного узла системы диагностики, например в работающем сверхпроводящем ускорителе заряженных частиц. Кроме того, разборка и сборка гелиевых криостатов с азотными экранами довольно трудоемка и затратна по времени.

С точки зрения надежности, устройства с подвижными частями и, следовательно, с пониженной надежностью при работе в двухфазных потоках с пульсацией давления не рассматривались. К таким устройствам можно отнести низкотемпературные турбинные расходомеры, а также измерители с подвижной частью в переменном сечении, когда положение подвижного элемента зависит от расхода криоагента. Преимущества и недостатки таких систем представлены, в частности в работе [4], где поставленная задача по созданию двухфазного криогенного расходомера довольно сложной конструкции, проверенная экспериментально с двухфазными потоками азота, все же не была решена полностью.

С позиций приемлемой точности измерений, расходомеры, так или иначе связанные с корреляционным методом определения средней скорости двухфазного потока не рассматривались [2, 3, 8], поскольку, как показано в работе [9], измерение взаимной корреляции существенно зависит от режима течения двухфазной смеси, причем в одном из случаев (в гомогенном двухфазном потоке) оно крайне

затруднено, а погрешность определения средней плотности может быть неприемлемой для решения поставленной задачи. Не рассматривались также криогенные кориолисовы расходомеры [10] из-за негативных особенностей их работы в двухфазных потоках и относительно высокого гидравлического сопротивления, особенно при высоких паросодержаниях [11].

По совокупности максимального удовлетворения приведенным выше требованиям остановимся на двухфазном расходомере, представляющем собой комбинацию емкостного датчика для определения средней плотности двухфазного потока (поскольку все криоагенты являются диэлектриками) и сужающего устройства (СУ) для нахождения средней скорости по перепаду давления на нем, которое довольно давно используется в двухфазной расходомерии [12, 13].

Для двухфазного гелия этот принцип был предложен, например, в работе [1], когда появились подходящие емкостные датчики паросодержания и были исследованы их характеристики, а затем реализован в работах [14, 15]. Однако, как показали дальнейшие исследования работы СУ с двухфазными потоками жидкость–газ [16–18], предложенный вариант такого расходомера для гелия [15] не лишен недостатков. Его алгоритм обработки сигналов довольно сложен, в некоторых случаях он учитывает не все особенности течения двухфазного потока через СУ, а калибровка затруднена и требует специального метрологического стенда.

Цели работы:

- минимизация отмеченных выше проблем при создании двухфазных расходомеров гелия на основе комбинации СУ и емкостного датчика паросодержания;
- расширение возможностей такой конфигурации в диапазоне расходов в пределах нескольких порядков (от примерно 5–6 до 1000 г/с и выше) на базе созданных компонентов расходомеров;
- упрощение процедуры калибровки преимущественно в системе, где расходомер предполагается установить;
- предложение методики расчета массовых расходов компонентов потока и паросодержаний, а также оценка неопределенностей установления общего расхода двухфазного потока.

## 2. ПРЕДЫДУЩИЙ ВАРИАНТ ДВУХФАЗНОГО РАСХОДОМЕРА ГЕЛИЯ И ЕГО ПРОБЛЕМЫ

Полезность диагностики равновесных двухфазных потоков гелия можно показать на аналоге системы криогенного обеспечения сверхпроводящего ускорителя нуклотрон, представленной на рис. 1, который заимствован из работы [19]. Отметим, что по такому же принципу криогенного обеспечения сооружается комплекс ускорителей НИКА/НИСА [20]. Решение проблемы диагностики в этом случае в принципе может быть осуществлено установкой, например довольно точного кориолис-расходомера  $\delta$  [10] в прямом потоке недогретого до насыщения гелия и высокочастотного (ВЧ) датчика паросодержания в коллекторе обратного двухфазного потока, установленного около сосуда-сборника  $I$  для жидкого гелия, если не предусмотрено перетоков криоагента из одного полукольца ускорителя в другое. Если последнее условие не выполняется, то в общем случае проблема решается путем установки двухфазного расходомера  $\beta$  горизонтальной ориентации вместо ВЧ-датчика на этом месте.

Один из вариантов двухфазного расходомера гелия, который в принципе может использоваться в такой системе, показан на рис. 2. В таком расходомере общий массовый расход  $G$  будет зависеть от комбинации измеренного перепада давления  $\Delta P$  на сужающем устройстве, средней плотности потока в СУ

$$\rho(\varphi) = \rho_g \varphi + \rho_l (1 - \varphi), \quad (1)$$

(где  $\varphi = A_g / (A_g + A_l)$  – истинное объемное паросодержание,  $A$  – площадь поперечного сечения, индексы  $g$  и  $l$  относятся к паровой/газовой и жидкой фазам), геометрического пара-

метра  $\xi = A_1 A_2 [2 / (A_1^2 - A_2^2)]^{1/2}$  конического СУ, где индексы 1 и 2 относятся к большему и меньшему сечениям СУ, а также некоего поправочного коэффициента  $k$ , учитывающего влияние режимов течения горизонтального двухфазного потока в СУ [14, 21]:

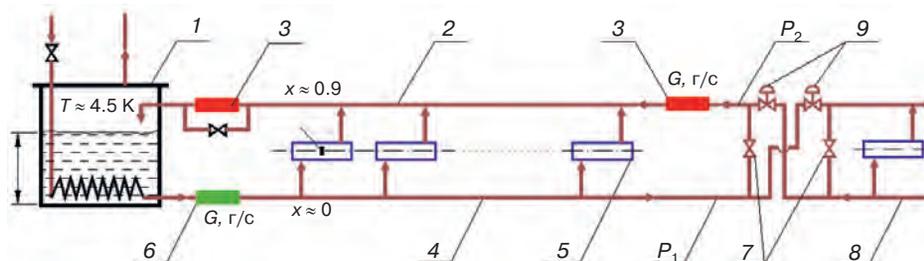
$$G = k(G, \varphi, T_s) \xi [\Delta P \rho(\varphi)]^{1/2}, \quad (2)$$

где  $T_s$  – равновесная температура, от которой зависят теплофизические свойства гелия. Величиной трения в СУ можно пренебречь из-за весьма низких значений вязкости жидкости и пара гелия [14, 17]. Некоторые оценочные характеристики  $\Delta P = f(G, \varphi)$  для случаев работы показанного на рис. 2 расходомера с гелием и водородом приведены в работе [15].

Оценим возможности такого двухфазного расходомера гелия прежде всего с позиции приемлемой точности измерений. Как показано в работе [14], максимальная относительная неопределенность нахождения величины расхода может быть оценена из соотношения

$$\delta G/G = \left\{ C + \left[ 0.5 \delta \varphi (\rho_l - \rho_g) / \rho(\varphi) \right]^2 \right\}^{1/2} [\%], \quad (3)$$

где коэффициент  $C$  зависит от характеристик использованных датчиков [14], величины температуры  $T_s$  и режимов течения двухфазного потока в СУ, т.е. от величины  $k$ . Так, при максимальной погрешности ВЧ-датчика кругового поперечного сечения  $\delta \varphi = 2\%$  и максимальной относительной погрешности для датчика перепада давления  $\delta \Delta P / \Delta P = 0.5\%$  величина  $C_h$  составляет примерно 2.2 [14] для гомогенного режима течения при  $k = 1$  и измерении относительной неопределенности  $\delta G/G$  в процентах, тогда как для произвольной структуры двухфазного потока эта величина гораздо больше ( $C_a \approx 31$ ) [14] из-за необходимости учета всех параметров, входящих



**Рис. 1.** Упрощенная схема системы криогенного обеспечения полукольца ускорителя нуклотрон: 1 – сосуд для жидкого гелия рефрижератора, 2 – обратный коллектор двухфазного потока гелия, 3 – двухфазный расходомер, 4 – подающий коллектор жидкого гелия, 5 – сверхпроводящий магнит, 6 – однофазный расходомер, 7 – дроссель, 8 – соседнее полукольцо ускорителя, 9 – регулирующие вентили.

в поправочный коэффициент  $k$ , который определяется относительно гомогенной модели [14] следующим образом:

$$k = \frac{G}{G_h} = \frac{G}{\xi \sqrt{\Delta P \rho}} = \frac{1}{\xi} \sqrt{\frac{2/\rho \left( \frac{x}{\rho_g} + \frac{1-x}{\rho_l} \right)}{x^3 \left( \frac{1}{\varphi_2^2 A_2^2} - \frac{1}{\varphi_1^2 A_1^2} \right) + \frac{(1-x)^3}{\rho_l^2} \left( \frac{1}{(1-\varphi_2)^2 A_2^2} - \frac{1}{(1-\varphi_1)^2 A_1^2} \right)}}. \quad (4)$$

В этом соотношении величина  $x = G_g / (G_g + G_l)$  – расходное массовое паросодержание, или относительная энтальпия, а индекс  $h$  соответствует гомогенному режиму течения. Соотношение (4) получено в предположении, что температуры в сечениях СУ практически не меняются ( $T_1 \approx T_2$ ), что следует из оценок перепада давления  $\Delta P$ , приведенных в работе [15] для конфигурации СУ, которая показана на рис. 2. В соотношении (4) величина  $\varphi_1$  измеряется с помощью ВЧ-датчика, а значения  $x$  и  $\varphi_2$  в узком сечении СУ рассчитывают методом последовательных приближений по методике, представленной в работе [14], с учетом экспериментальных значений скольжения фаз в двухфазном потоке гелия.

Таким образом, относительная неопределенность для гомогенного режима  $\delta G / G_h$  может изменяться примерно от 1.6% ( $\varphi = 0$ ) до 5.2%

( $\varphi = 1$ ), например при  $T_s = 4.4$  К, а для произвольной структуры  $\delta G / G_a$  – примерно от 5.6% ( $\varphi = 0$ ) до 7.5% ( $\varphi = 1$ ) [14]. Следовательно, раз-

рабатывая двухфазный расходомер, в частности гелия, нужно стремиться по возможности обеспечить гомогенные режимы течения в обоих сечениях СУ с учетом диапазонов применимости расходомера по величинам  $\varphi$  и  $G$ . При этом ориентация расходомера не имеет значения, а в соотношении (2) нужно учесть нивелирную составляющую  $\Delta P_H = \rho g H$ , где  $H$  – расстояние между точками отбора давления в СУ.

Рассмотрим далее некоторые основные характеристики, входящие в соотношение (2). Так, особенность емкостных датчиков для гелия [1, 22], сигнал  $f$  которых измеряется ВЧ-методом, состоит в том, что эти ВЧ-датчики позволяют измерять непосредственно величину  $\varphi$  и, соответственно, среднюю плотность  $\rho(\varphi)$  по соотношению (1), поскольку для гелия выполняется соотношение  $(\epsilon_l - \epsilon_g) / \epsilon_g \ll 1$ , а зависимость  $\varphi(f)$  практически линейна во всем диапазоне  $f$ : здесь  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость, а  $f$  – измеренная резонансная частота ВЧ-датчика. В свою очередь, величина  $\varphi$  может быть найдена с помощью, например ВЧ-датчика кругового поперечного сечения с однородным электрическим полем внутри его чувствительной части посредством следующего выражения, в котором коэффициенты  $k_1, k_2$  и  $k_3$  определяются при калибровке [1]:

$$\varphi = \frac{\epsilon_l - \frac{k_3 - k_1 f^2}{k_2 f^2 - 1}}{\epsilon_l - \epsilon_g}. \quad (5)$$

Методика определения зависимостей  $\varphi(\epsilon, f)$  с помощью различных ВЧ-датчиков паросодержания описана в работах [1, 23], что будет представлено подробнее в части II настоящей работы.

Что касается измеренных перепадов давления  $\Delta P$ , то, как показано в работах [16–18], для горизонтальных гомогенных двухфазных



**Рис. 2.** Основные компоненты двухфазного расходомера для гелия и водорода: ВЧ-датчик кругового поперечного сечения DN 38, соединенный с коническим сужающим устройством 38/9.5 мм, датчик перепада давления и измерительная система на основе модульного промышленного компьютера с удаленным ВЧ-детектором на переднем плане.

потоков сравнительно низкой вязкости, например вода–газ, выявлен кризис гидравлического сопротивления в СУ, характеризующийся неравенством  $\Delta P < \Delta P_h$ , где  $\Delta P_h$  – перепад давления, рассчитанный по гомогенной модели при относительно высоких скоростях потоков, что необходимо принять во внимание для реализации гелиевых расходомеров. Кризис гидравлического сопротивления при движении двухфазных потоков гелия в трубах был обнаружен в работе [24], когда  $\Delta P < \Delta P_h$ , тогда как  $\varphi = \varphi_h$ , что связано со специфической перестройкой структуры потока и объяснено в работе [25] с использованием материалов из работы [26]. Такой механизм может привноситься в процесс течения двухфазного гелия через СУ, и это влияет на измеренный перепад давления  $\Delta P$ .

Рассмотрим другие характеристики двухфазных потоков гелия и конических СУ, которые могут быть полезны при обосновании режимов работы компонентов расходомера.

### 3. ВАЖНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОНЕНТОВ ДВУХФАЗНОГО РАСХОДОМЕРА

Одна из необходимых зависимостей  $\varphi(x)$  для двухфазного потока в общем случае выглядит следующим образом:

$$\varphi = \left[ 1 + s \left( \rho_g / \rho_l \right) (1-x) / x \right]^{-1}, \quad (6)$$

где  $s = V_g / V_l$  – скольжение фаз, а  $V$  – скорость равновесного потока. Некоторые разновидности  $\varphi(x)$  для гелия при  $T_s = 4.5$  К представлены на рис. 3 для емкостных датчиков с чувствительными элементами кругового и кольцевого поперечных сечений. Верхняя линия соответствует гомогенным режимам течения

$$\varphi_h(x) = \left[ 1 + \left( \rho_g / \rho_l \right) (1-x) / x \right]^{-1} \text{ при } s = 1,$$

а нижние кривые соответствуют расслоенным режимам течения, например  $\varphi_{st-r} \approx 0.57$  при  $x = 0.3$  (синяя линия для круглой трубы) и  $s_{st-r} = (\rho_l / \rho_g)^{1/3} \approx 1.75$  [1] или  $\varphi_{st-a} \approx 0.485$  при  $x = 0.3$  (зеленая линия для кольцевого канала). Эти характеристики помогают выбрать тип ВЧ-датчика для реализации полндиапазонного расходомера, для которого предпочтительнее более чувствительный датчик, каковым является устройство кольцевого сечения [1, 22].

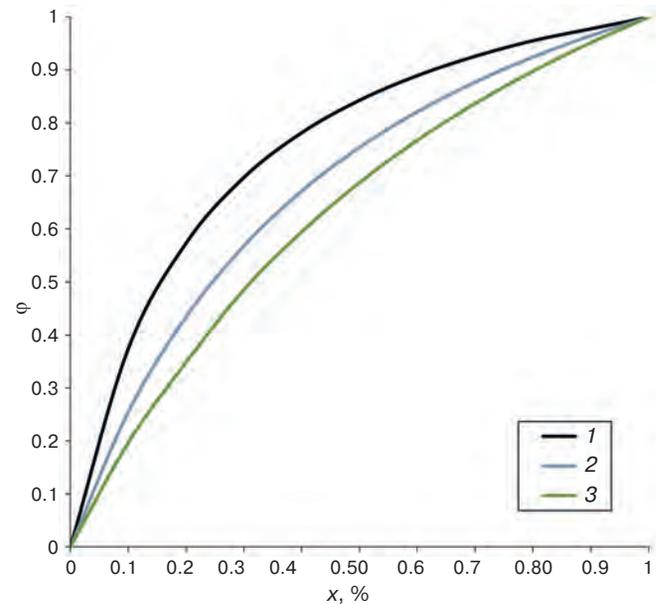
Как видно, значения производной  $d\varphi/dx$  существенно снижаются по мере роста массо-

вых расходных паросодержаний  $x$  для различных условий. Так, для кривой, соответствующей гомогенному режиму, при сравнительно малых  $x$ , например в диапазоне от 0.3 до 0.4, изменение составляет  $\delta\varphi \approx 0.085$ , в диапазоне  $x$  от 0.4 до 0.5 получаем  $\delta\varphi \approx 0.06$ , тогда как в интервале от 0.8 до 0.9 прирост снижается до  $\delta\varphi \approx 0.024$ . При этом необходимо учитывать следующую особенность емкостных датчиков паросодержания с чувствительными элементами кругового и кольцевого сечений: их чувствительности  $df/d\varphi$  существенно меняются из-за различия способов формирования в них электрического поля с заметным преимуществом в пользу кольцевых датчиков [1, 22]. Однако их гидравлическое сопротивление выше по сравнению с датчиками кругового поперечного сечения, что нужно принимать во внимание при выборе измерительного устройства для конкретных условий использования.

Как отмечалось, одной из важных характеристик упомянутых ВЧ-датчиков паросодержания служит их безразмерная чувствительность [22]

$$H = (1/f) (df/d\varphi) = \alpha (\varepsilon_l - \varepsilon_g) / 2, \quad (7)$$

где  $\alpha = (dC_{eff}/d\varepsilon) / C_{eff}$  – характеристика эффективности, или геометрический параметр дат-



**Рис. 3.** Зависимости истинного объемного паросодержания  $\varphi$  от массового расходного паросодержания  $x$  гелия для ВЧ-датчиков различных сечений чувствительных элементов при температуре насыщения  $T_s = 4.5$  К: 1 – гомогенный режим течения, 2 – расслоенный режим для ВЧ-датчика кругового поперечного сечения, 3 – расслоенный режим для ВЧ-датчика кольцевого поперечного сечения.

чика, определяемый его конструкцией с эффективной емкостью  $C_{eff}$ . Поскольку только часть электрического поля сосредоточена в измерительном объеме, эта величина всегда меньше единицы. Типичные величины для реальных ВЧ-датчиков кольцевого сечения  $\alpha_{ан}$  находятся в пределах от 0.7 до 0.75 [22], тогда как для датчиков кругового сечения  $\alpha_r \approx 0.15-0.18$ , что объясняется тем, что существенно большая часть их электрического поля находится вне измерительного объема из-за особенностей создания электрического поля посредством распределенной меандровой линии на трубе из диэлектрика [1, 22].

Как показано в работе [22], сигнальный частотный диапазон ВЧ-датчиков определяется соотношением

$$f_l - f_g \approx f_g \alpha (\epsilon_l - \epsilon_g) / 2. \quad (8)$$

Соотношения (7) и (8) необходимо учитывать при выборе типа ВЧ-датчика для конкретных условий эксплуатации. Так, если требуется обеспечить работу двухфазного расходомера в диапазоне расходных массовых паросодержаний  $x > 0.5$  (рис. 3), где производная  $d\phi/dx$  существенно ниже, чем для диапазона  $x < 0.5$ , то предпочтительнее ВЧ-датчик кольцевого сечения. При этом следует иметь в виду, что для гелия производная  $d\phi/df$  практически линейна, поскольку  $(\epsilon_l - \epsilon_g)/\epsilon_g \approx 0.04$ , т.е. предельно мала. В частности, для расходомера, предназначенного для предпочтительной работы в диапазоне  $x$  от 0.8 до 0.9, как в схеме, представленной на рис. 1, лучше выбирать ВЧ-датчик с чувствительным элементом кольцевого поперечного сечения.

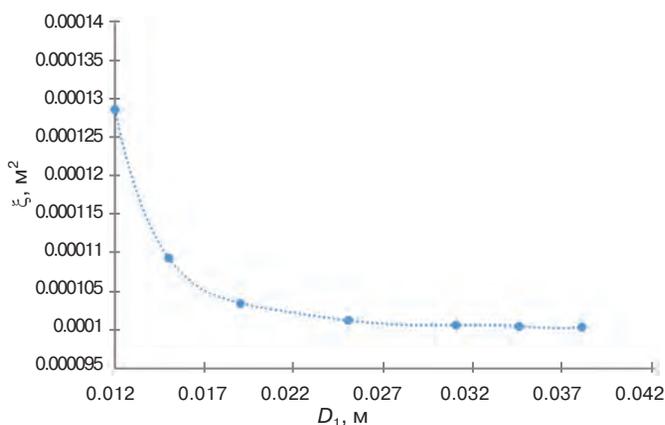
Для определения величин расходов из выражения (2) при  $k = 1$  необходимо прежде всего оценить поведение геометрического параметра  $\xi$  в зависимости от размеров СУ. При этом, как отмечалось, необходимо контролировать величину возможного перепада давления через СУ  $\Delta P_h = G^2 / \xi^2 \rho$ , которая должна находиться в разумных пределах. Такая зависимость  $\xi(D_1)$  для СУ, показанного на рис. 2, представлена на рис. 4 при фиксированном меньшем диаметре  $D_2 = 9.5$  мм.

На рис. 4 видно, что уменьшение большего диаметра вдвое с 38 до примерно 19 мм сопровождается увеличением величины  $\xi$  всего на 3%, что практически не влияет на перепад давления через СУ при фиксированном расходе  $G$ , тогда

как дальнейшее снижение диаметра до 12 мм приводит к росту геометрического параметра  $\xi$  уже на 28% с соответствующим снижением  $\Delta P_h$  в 1.6 раза, что может быть нежелательным. В свою очередь, массовая скорость потока  $m_s = G/A$  в меньшем сечении с диаметром 19 мм возрастает вчетверо по сравнению с величиной  $m_b$  для сечения 38 мм. Это может позволить реализовать гомогенные режимы течения в обоих сечениях СУ 19/9.5 мм при определенных расходах  $G$ , когда  $\phi \approx \phi_h$ . В этом случае корректирующий коэффициент  $k(G, \phi, T)$  можно принять равным единице.

Для реализации этого случая необходимо выполнить последовательное дросселирование потока в паре конических СУ с коэффициентом сужения  $D_1/D_2 \approx D_2/D_3 \approx 2$  и перевести поток гелия от входного диаметра  $D_1 = 38$  мм к сужающему устройству меньших размеров с *похожим* (практически таким же) геометрическим параметром  $\xi(D_2/D_3 = 19/9.5$  мм), используя его для измерения перепада давления  $\Delta P$ . Похожее решение было использовано в работе [16], что позволило применить квазигомогенную модель  $\phi = 0.8\phi_h$  для определения средней плотности и массовых расходов в горизонтальных потоках вода – сжатый воздух с приемлемой для практики относительной погрешностью  $\delta G/G \leq \pm 2\%$  во всем диапазоне величин расходов и меньшей погрешностью ( $\delta G/G \leq \pm 1\%$ ) при максимальных расходах воды.

Отметим, что вариант из работы [27] предполагаемого улучшения характеристик двух-

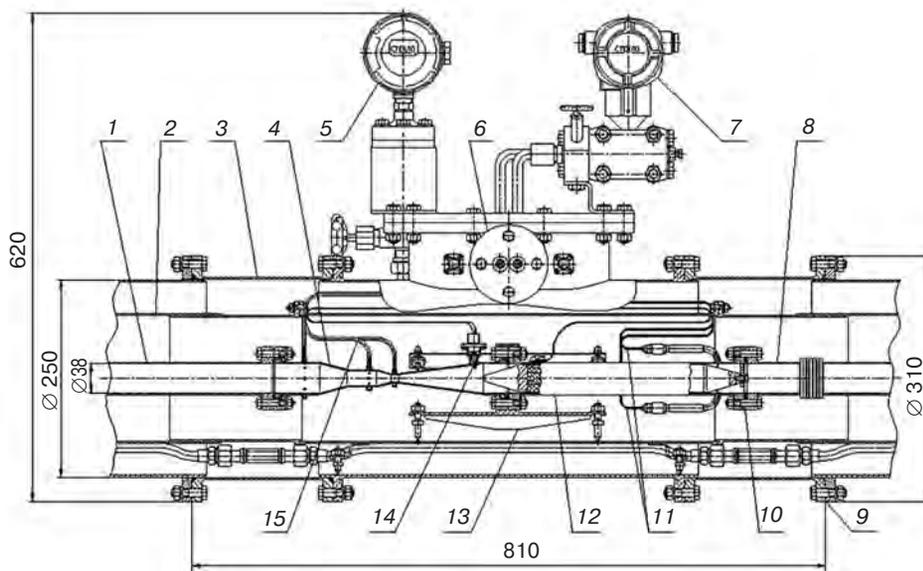


**Рис. 4.** Зависимость геометрического параметра  $\xi$  конического сужающего устройства от большего диаметра сужающего устройства  $D_1$ , показанного на рис. 2, при фиксированном меньшем диаметре  $D_2 = 9.5$  мм.

фазного расходомера гелия, показанного на рис. 2, посредством использования дорогостоящих прецизионных датчиков температуры с погрешностью измерения  $\pm 1$  мК вместо датчика перепада давления  $\Delta P$  и расчетной равновесной модели  $T_s(P_s)$  поведения потока в СУ представляется неубедительным по следующим причинам. Во-первых, равновесная модель процессов в двухфазных потоках гелия, значительно ускоряющихся в СУ на коротком участке (около 50 мм), не обоснована. Во-вторых, указанный  $T$ -датчик займет в узком сечении СУ  $D_2 = 9.5$  мм около 15% площади, что не отмечено в работе [27] и уже вызывает недоверие к представленным расчетам. В-третьих, не учтено влияние фактора торможения потока на торце  $T$ -датчика, что особенно существенно при отношении сечений СУ в 16 раз и расходе, например около 60 г/с, на который рассчитан расходомер [15], и относительно больших величинах  $x(\varphi)$ . Это делает предложенный метод [27] довольно сомнительным. Кроме того, экспериментальная проверка предложенного расчетного метода авторами не проведена, что отмечено в заключении работы [27].

#### 4. КОНСТРУКЦИЯ НОВОГО ДВУХФАЗНОГО РАСХОДОМЕРА ГЕЛИЯ

Конструкция нового варианта горизонтального расходомера гелия, основанного на применении соотношения (2) для определения расхода двухфазного потока, которое в дальнейшем должно быть уточнено, показана на рис. 5. В этой конструкции вместо ВЧ-датчика кругового поперечного сечения DN 38 (рис. 2) применен аналог кольцевого сечения – позиция 12, в котором сохранена равномерность электрического поля в чувствительном элементе. Пара ВЧ-датчиков аналогичной конструкции была установлена в обратных потоках системы криогенного обеспечения сверхпроводящего ускорителя нуклотрон несколько лет назад. Как рекомендовано выше и в работах [16, 28], сужающее устройство (позиция 4) выполнено с последовательным дросселированием двухфазного потока гелия в двух секциях – 38/19 мм и 19/10 мм с углами сужения  $30^\circ$  с отношением диаметров около 2, что обеспечивает близкие к гомогенному режимы течения в сечении  $D_2 = 19$  мм, а в сечении  $D_3 = 10$  мм гарантирует



**Рис. 5.** Конструкция горизонтального двухфазного расходомера гелия на основе комбинации сдвоенного конического сужающего устройства и ВЧ-датчика паросодержания кольцевого сечения: 1 – труба для потока гелия DN 38, 2 – азотный экран, 3 – сдвижная монтажная муфта вакуумного корпуса, 4 – сдвоенное коническое сужающее устройство, 5 – датчик давления, 6 – узел вывода сигналов датчиков давления и перепада давления, ВЧ-датчика и температурных датчиков потока и корпуса, 7 – датчик перепада давления, 8 – выходная труба гелия с компенсационным сильфоном, 9 – фланцевое уплотнение корпуса, 10 – холодное фланцевое уплотнение гелиевой трубы, 11 – ВЧ-кабели, 12 – ВЧ-датчик паросодержания кольцевого поперечного сечения, 13 – опорный узел, 14 – датчик температуры потока, 15 – импульсные трубки сужающего устройства.

устойчивую гомогенную структуру. Диаметр основной гелиевой магистрали DN 38 оставлен прежним и рассчитан на возможный расход  $G$  около 60 г/с [15]. При этом ВЧ-датчик 12 установлен в конце выходного конуса СУ с углом расширения  $15^\circ$  [28], а уплотнение отдельных участков гелиевой трубы выполнено посредством проверенного фланцевого уплотнения 10 с использованием отоженных медных прокладок. Для компенсации температурных деформаций предусмотрен патрубков 8 с сильфоном.

Снижение теплопритоков к гелиевой трубе 1 за счет излучения осуществляется с помощью радиационного экрана 2, охлаждаемого жидким азотом. Для удобства монтажа на корпусе горизонтального криостата двухфазного расходомера предусмотрены сдвижные муфты 3. Датчики давления 5 и перепада давления 7 установлены на горизонтальной крышке горловины криостата, а вывод проводов датчиков температуры потока и корпуса, ВЧ-датчика 12 и импульсных трубок 15 СУ с соответствующими тепловыми мостами производится через боковую крышку 6.

Оценим теперь порядок величины массовой скорости  $m = G/A$ , при которой в обоих сечениях СУ можно реализовать гомогенизированные режимы течения двухфазных потоков гелия. Это можно сделать на основе экспериментальных данных по режимам течения [29–33], гидравлическому сопротивлению при течении в горизонтальных каналах [24, 25, 34, 35] и показаниям ВЧ-датчиков паросодержания гелия [22, 29, 36].

Так, гидравлические сопротивления в трубах за счет трения при сравнительно высоких массовых скоростях гелия  $m \approx 120$  кг/(м<sup>2</sup>·с) и выше [240 кг/(м<sup>2</sup>·с)] выглядят похожими как качественно, так и количественно, но характеризуются кризисом в диапазоне  $x$  от примерно 0.2 до 0.6, когда измеренная величина  $\Delta P$  заметно ниже гомогенных значений  $\Delta P_h$ . Это характерно как для вертикальной, так и для горизонтальной ориентации, причем перепады давления  $\Delta P$  практически не зависят от диаметра исследованных труб – 1.6 мм в работе [24] и 4.6 мм в работах [25, 34, 35].

Что касается характеристик гелиевых ВЧ-датчиков паросодержания круговых сечений, из которых состоит СУ, то универсальная зависимость выглядит следующим образом [29, 37]:

$$\varphi = \left[ 1 + \left( \rho_g / \rho_l \right)^n (1-x) / x \right]^{-1} \quad (9)$$

где  $n = 1 - y$ , а зависящая от величины  $m$  модифицированная часть показателя степени определяется выражением  $y = 0.577e^{-0.027m}$ . Эта зависимость справедлива для диапазона  $20$  кг/(м<sup>2</sup>·с)  $\leq m \leq 200$  кг/(м<sup>2</sup>·с) при горизонтальной ориентации: при  $m = 200$  кг/(м<sup>2</sup>·с) она переходит в гомогенную характеристику  $\varphi[x, (\rho_g/\rho_l)]$ , когда  $n \approx 1$  – зависимость (6) при  $s = 1$ , или в зависимость для гладкого расслоенного режима течения  $\varphi[x, (\rho_g/\rho_l)^{2/3}]$  при  $n \approx 2/3$  – зависимость (2) на рис. 2 при  $s = (\rho_l/\rho_g)^{1/3}$ . Отметим, что при  $m \geq 100$  кг/(м<sup>2</sup>·с) показатель  $n \geq 0.96$ , т.е. в этом случае режимы течения гелия могут рассматриваться как гомогенизированные, что хорошо согласуется с отмеченной ранее величиной  $m \approx 120$  кг/(м<sup>2</sup>·с), при которой измеренный перепад  $\Delta P$  мало меняется в круглых трубах в диапазоне  $x$  от 0.2 до 0.6.

Остановимся теперь на режимах течения горизонтальных двухфазных потоков гелия, карты которых представлены в работах [29, 38, 39] для трубы диаметром 7.9 мм, что похоже на меньший диаметр СУ, представленного на рис. 5. Так, граница расслоенного режима течения находится в пределах массовой скорости  $m_{str}$  от 40 до 60 кг/(м<sup>2</sup>·с), причем для гелия совсем не наблюдается снарядный режим (slug pattern), и вместо него происходит постепенный переход в прерывистый и гомогенизированный режимы с разрушением границы раздела фаз по мере роста  $m$  до величины около 120–125 кг/(м<sup>2</sup>·с), прокомментированной ранее для характеристик  $\Delta P$  и  $\varphi(x)$ .

Отметим, что предложенные в работе [31] соотношения для границ гомогенизированных структур потока гелия дают завышенные значения  $m_h$  в области величин  $\varphi$  примерно от 0.3 до 0.8. Поэтому эти границы можно оценить по отношению  $m_h/m_{str} \approx 2.1$  для карты режимов течения двухфазных потоков гелия [29, 31]. Изменение граничной величины  $m_{str}$  в зависимости от диаметра трубы в пределах до 70 мм оценивается значениями  $m_{str}(8 \text{ мм}) \approx 60$  кг/(м<sup>2</sup>·с),  $m_{str}(20 \text{ мм}) \approx 69$  кг/(м<sup>2</sup>·с),  $m_{str}(38 \text{ мм}) \approx 76$  кг/(м<sup>2</sup>·с) и  $m_{str}(70 \text{ мм}) \approx 83$  кг/(м<sup>2</sup>·с). Следовательно, граничные пределы  $m_h$  можно оценить по порядку величин следующими значениями:  $m_h(8 \text{ мм}) \approx 125$  кг/(м<sup>2</sup>·с) и  $m_h(70 \text{ мм}) \approx 175$  кг/(м<sup>2</sup>·с). Последнюю величину  $m_h^{\max} = 175$  кг/(м<sup>2</sup>·с) можно использовать для дальнейших оценок характеристик двухфазных расходомеров гелия различных диаметров в указанных пределах.

Так, при отмеченной величине  $m_h^{\max}$  расход гелия через расходомер, показанный на рис. 5, оценивается величиной  $G_{\min} = m_h^{\max} \cdot A_1 \approx 50$  г/с, перепад давления на насыщенной жидкости при  $T_s = 4.5$  К составляет  $\Delta P_l = (G/\xi)^2/\rho_l \approx 1.6$  кПа, а на насыщенном паре равен  $\Delta P_g = 1.96(\rho_l/\rho_g) \approx \approx 8.3$  кПа, что соответствует разности температур в сечениях СУ  $\Delta T_s < 0.08$  К. Отмеченные потери давления в СУ частично восстанавливаются в выходном конусе при расширении потока. В принципе величину этого расхода можно несколько уменьшить или удвоить до  $G_{\max} \approx 100$  г/с при  $\Delta P_l \approx 6.2$  кПа и  $\Delta P_g \approx 33.3$  кПа. Отметим, что в большем сечении  $D_1 = 38$  мм первого из двух СУ (позиция 4 на рис. 5) массовая скорость при расходе 50 г/с должна быть около 44 кг/(м<sup>2</sup>с), и при такой скорости режим течения будет гарантированно расслоенным, что негативно характеризует работу расходомера, показанного на рис. 2, поскольку нужно использовать довольно сложное соотношение (4), не проверенное экспериментально.

Характеристики ВЧ-датчика кольцевого сечения в конструкции, представленной на рис. 5, получаются следующими. Диаметр, в котором установлен ВЧ-датчик на центрирующих проставках, выбран таким же, как диаметр гелиевой магистрали, т.е. 38 мм, кольцевой зазор для гелия составляет 1.5 мм, а длина кольцевого канала с чувствительным и вспомогательными участками равна 300 мм. При площади проходного сечения около 172 мм<sup>2</sup> массовая скорость в датчике составит  $m_a \approx 290$  кг/(м<sup>2</sup>с) и режим течения в соответствии с экспериментальными данными [31] должен быть гарантированно гомогенным.

Для такого ВЧ-датчика взаимосвязь величины  $\phi$  и резонансной частоты  $f$  определяется соотношением [1, 22]

$$\phi = \left[ \varepsilon_l - \left( K_1^2 / f^2 - K_2 \right) \right] / (\varepsilon_l - \varepsilon_g), \quad (10)$$

где  $K_1$  и  $K_2$  – калибровочные коэффициенты, которых меньше, чем для датчика кругового сечения [соотношение (5)]. Основные характеристики ВЧ-датчика при  $T_s = 4.5$  К таковы:  $f_g = 176.031$  МГц,  $f_l = 173.238$  МГц, сигнальный диапазон  $\Delta f = f_g - f_l = 2.793$  МГц,  $K_1 = 190.6561423$  МГц,  $K_2 = 0.1644754$  МГц, а инструментальная погрешность [22] составляет  $\delta\phi_{\text{inst}} = 2\delta f_{\text{inst}}/\Delta f < \pm 0.1\%$  при погрешности измерения частоты  $\delta f_{\text{inst}} = \pm 1$  кГц. Отметим, что такой ВЧ-датчик позволяет однозначно определять

и относительную энтальпию двухфазного потока  $x(\phi_h)$  на основе соотношения (9) при  $n = 1$ , что полезно при оценке энергетического баланса цепочки сверхпроводящих магнитов. При этом дополнительное гидравлическое сопротивление в канале ВЧ-датчика оценивается величиной около 0.05 бар при расходе 60 г/с и паросодержании  $x = 1$ .

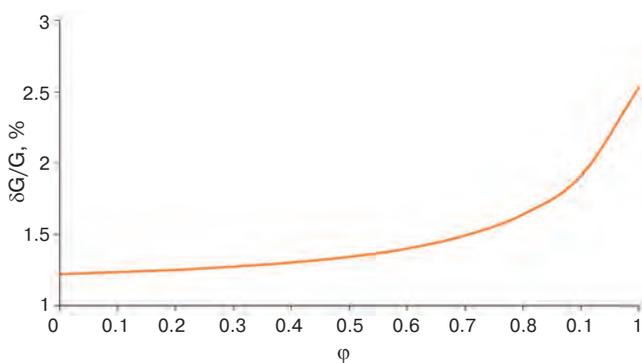
Измерение сигналов датчиков предложенного двухфазного расходомера гелия осуществляется с помощью аналогичной системы на базе 6-слотового промышленного компьютера (ПК), показанного на рис. 2. Эта система включает [40] стандартную процессорную плату с разъемами клавиатуры, ТВ-монитора и интерфейса RS485, а также платы собственного производства для измерения температур, давления и перепада давления, резонансной частоты ВЧ-датчика паросодержания и 8-канальный цифро-аналоговый преобразователь для передачи информации на сервер управления. Для измерения сигнала кольцевого ВЧ-датчика использовалась плата на основе синтезатора частоты. Обмен данными между ПК и сервером реализован по Ethernet-кабелю в соответствии со стандартным TCP/IP-протоколом. Используемые датчики – “Сапфир-22 МПС” класса 0.25% для измерения давления и перепада давления, специально отобранные резистивные теплостойкие влагостойкие опрессованные (ТВО) датчики с неопределенностью  $\Delta T \leq \pm 10$  мК при  $T \leq 5$  К [41] для измерения температур потока гелия и корпуса расходомера. В работе [7] было показано, как посредством отмеченных датчиков [41] и блоков электроники для многоканального промышленного компьютера [40] можно выполнить диагностику кольца сверхпроводящего ускорителя частиц, упрощенная схема которого показана на рис. 1.

Как отмечалось, относительная неопределенность нахождения величины расхода может быть оценена из соотношения (3) [14], в котором уточненный коэффициент  $C \approx 1.33$  зависит от характеристик примененных устройств:  $\delta G_0/G_0 \approx 1\%$  при использовании кориолисова расходомера для оценки неопределенности величины  $\xi$ ,  $\delta \Delta P/\Delta P = 0.25\%$  для стандартного датчика перепада давления Сапфир-22 МПС,  $\delta \rho_0/\rho_0 = 0.5\%$  при определении плотности из таблиц,  $\delta \Delta P/\Delta P \approx \approx 1\%$  при усреднении величины перепада давления  $\Delta P$  из-за колебаний давления в двухфазном потоке гелия,  $\delta \rho = (\rho_l - \rho_g)\delta\phi$  [14], где макси-

мальная абсолютная ошибка измерения паросодержания ВЧ-датчиком кольцевого сечения  $\delta\varphi \approx 1\%$  [22]. Поскольку по мере роста величины  $\varphi_h$  плотность  $\rho_h$  линейно снижается в соответствии с выражением (1), неопределенность  $\delta G_h/G_h$  должна, соответственно, нелинейно увеличиваться, что зависит от равновесной температуры  $T_s$ , с которой связаны плотности компонент  $\rho_l$  и  $\rho_g$ . Так, при  $T_s = 4.5$  К величины  $\delta G_h/G_h$  могут быть около  $\pm 1.2\%$  ( $\varphi_h = 0$ ),  $\pm 1.3\%$  ( $\varphi_h = 0.5$ ),  $\pm 1.6\%$  ( $\varphi_h = 0.8$ ) и  $\pm 2.0\%$  ( $\varphi_h = 0.92$ ), что иллюстрирует рис. 6.

В соответствии с соотношением (3) зависимости  $\delta G/G(\varphi_h)$  несколько снижаются с ростом равновесной температуры и повышаются с падением  $T_s$ , что связано с характером кривых  $\rho_l(T_s)$  и  $\rho_g(T_s)$ . Полученные оценки  $\delta G_h/G_h$  для гелия в диапазоне  $\varphi_h$  от 0 до примерно 0.8 хорошо согласуются с экспериментальными данными для сравнительно маловязких гомогенизированных потоков вода – сжатый воздух в коническом СУ 70/50 мм с углом сужения  $30^\circ$  при минимизации погрешностей определения газосодержаний [16].

Таким образом, в соотношении (2) для определения величины общего расхода посредством предложенного метода (рис. 5) сведены к минимуму основные проблемы двухфазных расходомеров гелия горизонтальной ориентации: поправочный коэффициент  $k(G, \varphi, T_s) = 1$ , средняя плотность потока  $\rho(\varphi)$  находится по соотношениям (1) и (10) в соответствии с однозначной гомогенной зависимостью (6) при  $s = 1$  (рис. 3), посредством которых описываются характеристики высокочувствительного ВЧ-датчика паросодержания кольцевого поперечного сечения, представленные ранее. Однако оста-



**Рис. 6.** Расчетная оценка зависимости относительной неопределенности нахождения величины расхода  $\delta G/G$  от истинного объемного паросодержания гелия  $\varphi_h$  при  $T_s = 4.5$  К для комбинации ВЧ-датчика кольцевого поперечного сечения и конического СУ.

ется разобраться с возможным случаем показаний датчика перепада давления через СУ  $\Delta P < \Delta P_h$ , отмеченным в конце разд. 2 для маловязких потоков, тогда как относительно вязкие двухфазные потоки ведут себя по-другому [18] и качественно, и количественно.

Эта проблема решается по месту установки расходомера (*in situ*) при конфигурации системы криогенного обеспечения, показанной на рис. 1. Для этого нужно установить поправочный коэффициент  $C_{hc}(\varphi) = \Delta P/\Delta P_h$ , который был введен в работе [17] для коррекции гомогенной модели маловязких потоков с учетом фактора трения в СУ  $k_{fr} < 1$ . Так, для горизонтального конического СУ 70/50 мм при течении сравнительно низковязкой смеси вода–воздух при давлении  $P = 5$  бар эти коэффициенты составляли, например,  $C_{hc} = 0.83$  при  $\varphi_h = 0.5$  и  $C_{hc} = 1$  при  $\varphi_h = 0$  [42], т.е. из-за кризиса гидравлического сопротивления в СУ при измеренной величине перепада давления  $\Delta P$  расход  $G$  при  $\varphi_h = 0.5$  соответствует увеличенному значению примерно на  $10\%$  —  $(1/C_{hc})^{1/2} \approx 1.1$ . Для гелия зависимость  $C_{hc}(\varphi_h)$  и расходы  $G_g$  и  $G_l$  находятся из уточненного соотношения [17]

$$G = \xi \left[ \rho_h(\varphi) \Delta P / C_{hc} \right]^{1/2}, \quad G_g = Gx, \quad G_l = G(1-x) \quad (11)$$

при факторе трения  $k_{fr} = 1$  и измеренном общем расходе  $G$  посредством, например, расходомера Кориолиса [10] на потоке однофазного жидкого гелия, как в схеме рис. 1, или с помощью стандартной диафрагмы, используемой в работах [29, 34]. В соотношении (11) значение  $\xi$  известно из геометрических размеров СУ, а величины  $\varphi$  и  $\rho_h(\varphi)$  определяются с помощью измерительных средств двухфазного расходомера, как отмечено выше. В работах [43, 44], например, показано, что величины статических теплопритоков и динамических тепловыделений  $W$  в сверхпроводящих магнитах при различных циклах работы в зависимости от скорости изменения тока и  $dB/dt$  хорошо известны и определены на стенде при тестировании, на основе чего находится необходимая характеристика  $\varphi(W)$ . При таком подходе полученная зависимость  $C_{hc}(\varphi_h) = \xi^2 \rho_h(\varphi) \Delta P / G^2$  будет учитывать также влияние оставшихся неучтенных факторов, например неравновесности процессов в СУ при ускорении двухфазного потока и отсутствие камер отбора давления для импульсных трубок СУ, отверстия которых могут забиваться остатками водорода и неона в гелии.

Таким образом, для определения расхода двухфазного потока гелия обосновано использование сравнительно простого и однозначного соотношения (11), в котором при вертикальной ориентации расходомера нужно учитывать нивелирную составляющую перепада давления  $\Delta P_n$  за счет разницы высот импульсных трубок на СУ. Что касается практического случая, представленного на рис. 1, то для двухфазного расходомера, показанного на рис. 2, в выражении (11) в первом приближении можно принять, что  $C_{hc}^{-1/2} \approx 1$ . Это объясняется тем, что гидравлическое сопротивление труб при гомогенных режимах течения и  $x \approx 0.9$  удовлетворительно описывается гомогенной моделью [25, 35], и похожий механизм поведения двухфазного потока гелия может быть характерен и для СУ.

### 5. ДВУХФАЗНЫЕ РАСХОДОМЕРЫ ГЕЛИЯ ДЛЯ ШИРОКОГО ДИАПАЗОНА ВЕЛИЧИН РАСХОДА

Вариант полнодиапазонного двухфазного расходомера гелия, рассчитанный на значительно меньший расход  $G$  по сравнению с конструкцией, показанной на рис. 5, можно создать на основе имеющегося ВЧ-датчика кольцевого сечения диаметром 16 мм с зазором  $\delta = 0.6$  мм [22] и резонансной частотой  $f_g \approx 210$  МГц – уменьшенный аналог расходомера, представленного на рис. 5. Такой расходомер выполняется на базе сдвоенного СУ с диаметрами  $D_1 = 16$  мм,  $D_2 = 8$  мм и  $D_3 = 4$  мм; его величина минимального расхода  $G_{\min} = m_h^{\max} \cdot A_8 \approx 9$  г/с ( $\Delta P_l = 1.9$  кПа,  $\Delta P_g = 10.4$  кПа), может быть уменьшена до 5–6 г/с, что по массовой скорости в сечении 8 мм оценивается экспериментально обоснованной величиной  $m_8 \approx 120$  кг/(м<sup>2</sup>с), обсужденной ранее, а  $G_{\max} \approx 12$  г/с.

Если использовать более крупный ВЧ-датчик кольцевого поперечного сечения диамет-

ром 110 мм с зазором  $\delta = 5$  мм и резонансной частотой  $f_g \approx 104$  МГц [22], то при использовании измерительного СУ с диаметрами 60/30 мм значения расходов существенно увеличатся до  $G_{\min} \approx 500$  г/с ( $\Delta P_l = 1.9$  кПа,  $\Delta P_g = 10.4$  кПа) и  $G_{\max} \approx 1000$  г/с.

Для систем транспортировки жидкого гелия, работающих на начальном крутом участке характеристики  $\varphi(x)$  при  $x < 0.5$  (рис. 3), или там, где не требуется относительно высокая точность измерений при  $x > 0.5$ , целесообразно использовать ВЧ-датчики кругового поперечного сечения пониженной точности, но с меньшим гидравлическим сопротивлением по сравнению с кольцевыми аналогами. При этом возможны два варианта конфигурации расходомера, когда ВЧ-датчик расположен в меньшем сечении СУ –  $D_2$ , или в большем сечении –  $D_1$  во втором случае. Необходимость применения дополнительного СУ для предварительного ускорения потока зависит от гидравлического сопротивления и длины общей магистрали, где устанавливается двухфазный расходомер, и если эта длина относительно невелика, то дополнительное СУ может не потребоваться.

Пример второго варианта такого расходомера, который в принципе заменяет расходомер, показанный на рис. 5, представлен на рис. 7. Его проточная сигнальная часть состоит из ВЧ-датчика кругового поперечного сечения с внутренним диаметром  $D_2 = 20$  мм и СУ 20/10 мм ( $D_1/D_2$ ), которое похоже на измерительное СУ на рис. 5. Это СУ выполнено с похожими геометрическими характеристиками, как представлено в работах [16, 28] и разд. 4, с импульсными трубками, отстоящими от конуса на полдиаметра, что проверено экспериментально на однофазных, двухфазных и трехфазных потоках.

Резонансная частота показанного на рис. 8 ВЧ-датчика DN 20 при  $T_s = 4.5$  К составляет

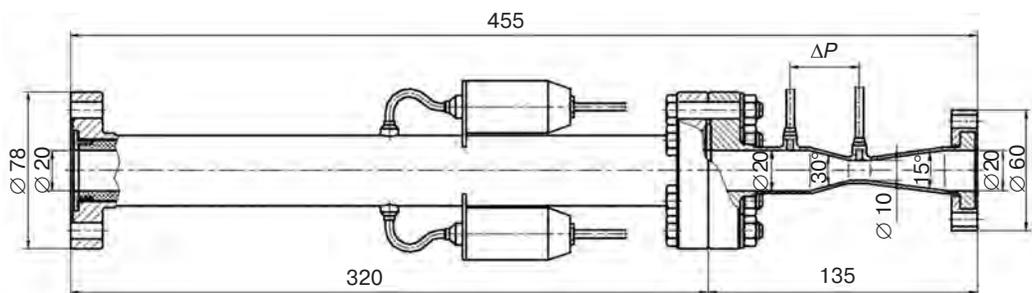


Рис. 7. Сигнальная часть двухфазного расходомера гелия для  $G \approx 55$ –110 г/с: комбинация ВЧ-датчика кругового поперечного сечения DN 20 и конического сужающего устройства 20/10 мм.

$f_g \approx 37.0$  МГц, а сигнальный диапазон равен  $\Delta f \approx 0.12$  МГц. Для измерения резонансной частоты подобных датчиков использовалась ВЧ-плата на базе генератора качающейся частоты [40], работоспособная в диапазоне частот от 20 до 90 МГц и обеспечивающая погрешность измерения  $\delta f = \pm 0.25$  кГц. Диапазон расходов такого двухфазного расходомера гелия оценивается величинами от  $G_{\min} = 55$  г/с ( $\Delta P_l = 1.9$  кПа,  $\Delta P_g = 10.4$  кПа) до  $G_{\max} = 110$  г/с. Это устройство может быть соединено с магистралями диаметром 20 мм, если их длина сравнительно невелика, или с протяженной магистралью диаметром 38 мм для обеспечения меньшего общего гидравлического сопротивления. В последнем случае необходимы конические переходники 38/20 мм на входе в ВЧ-датчик и выходе из СУ.

Собранные для проверки ВЧ-датчик DN 20 и СУ 20/10 мм иллюстрирует рис. 8. Двухфазный расходомер гелия на базе ВЧ-датчика DN 38 кругового сечения, показанного на рис. 2, выполняется для гораздо больших величин расходов, если в качестве сигнальных устройств использовать его и СУ 38/19 мм. В этом случае значения расходов при  $T_s = 4.5$  К оцениваются как  $G_{\min} \approx 200$  г/с ( $\Delta P_l = 1.9$  кПа,  $\Delta P_g = 10.4$  кПа) и  $G_{\max} \approx 400$  г/с.

В свою очередь, при использовании СУ больших размеров (70/38 мм) и установке ВЧ-датчика DN 38 в меньшем сечении СУ значения расходов можно увеличить более чем втрое:  $G_{\min} \approx 675$  г/с ( $\Delta P_l = 1.4$  кПа,  $\Delta P_g = 7.3$  кПа),



**Рис. 8.** Сборка сигнальной части двухфазного расходомера гелия DN 20: сужающее устройство 20/10 мм на переднем плане, соединенное с ВЧ-датчиком кругового поперечного сечения, и анализатор спектра Agilent N9340B.

$G_{\max} \approx 1350$  г/с. Такой вариант расположения ВЧ-датчика в расходомере более подробно представлен в части II настоящей работы.

Вариант расходомера на еще большие значения расходов делается на основе ВЧ-датчика кругового поперечного сечения с внутренним диаметром 72 мм, показанного на рис. 9. Его резонансная частота  $f_g \approx 27.10$  МГц при  $T_s = 4.25$  К. Так, при  $T_s = 4.5$  К и СУ 72/36 мм, похожем на предыдущий случай (70/38 мм), расходы гелия оцениваются несколько большими величинами ( $G_{\min} \approx 710$  г/с,  $G_{\max} \approx 1420$  г/с), но при меньшем общем гидравлическом сопротивлении, а при СУ 125/72 мм и расположении ВЧ-датчика в его меньшем сечении  $G_{\min} \approx 2150$  г/с. Однако при  $D_1 > 70-72$  мм довольно проблематично использовать величину  $m_h^{\max} = 175$  кг/(м<sup>2</sup>с) для подобных оценок, что требует соответствующей экспериментальной коррекции.

Основные характеристики рассмотренных двухфазных расходомеров гелия горизонтальной ориентации представлены в итоговой табл. 1.



**Рис. 9.** ВЧ-датчик кругового поперечного сечения DN 72 для работы с двухфазными потоками гелия при  $1.8 \text{ К} < T_s < 4.8 \text{ К}$  и измерительная система на базе промышленного компьютера.

**Таблица 1.** Оценочные характеристики двухфазных расходомеров гелия при  $T_s = 4.5$  К на базе имеющихся ВЧ-датчиков паросодержания

Тип ВЧ-датчика	Размеры ВЧ-датчика, мм	Размеры СУ, $D_1/D_2$ , мм	$G_{\min}$ , г/с	$\Delta P_p$ , кПа	$\Delta P_g$ , кПа
Кольцевой	$D = 16, \delta = 0.6$	8/4	6	0.9	4.9
Кольцевой	$D = 16, \delta = 0.6$	8/4	9	1.9	10.4
Кольцевой	$D = 38, \delta = 1.5$	19/10	50	1.6	8.3
Круговой	$D = 20$	20/10	55	1.9	10.4
Круговой	$D = 38$	38/19	200	1.9	10.4
Кольцевой	$D = 110, \delta = 5$	60/30	495	1.9	10.4
Круговой	$D = 38$	70/38	675	1.4	7.3
Круговой	$D = 72$	72/36	710	1.9	10.4
Круговой	$D = 72$	125/72	2150	1.04	5.6

## 6. ВЫВОДЫ

Для гелия с его низкой плотностью жидкости и малым отношением плотностей фаз проблема неопределенности измерения величины расхода, связанная с влиянием наиболее сложного поправочного коэффициента  $k(G, \varphi, T_s)$ , который зависит от режима течения двухфазного потока, решается посредством двухступенчатого дросселирования в сужающем устройстве с коэффициентом сужения  $D_1/D_2 \approx D_2/D_3 \approx 2$  и использования сужающего устройства с меньшим геометрическим параметром  $\xi(D_2/D_3)$  для измерения перепада давления  $\Delta P$ . Такой подход позволяет применить гомогенную модель для определения коэффициента  $k(G, \varphi, T)$ , когда эту величину можно принять равной единице. Фактором трения в СУ для гелия можно пренебречь из-за его чрезвычайно низкой вязкости.

Другая проблема неопределенности измерения величины расхода, связанная с нахождением средней плотности потока  $\rho = \rho_g \varphi + \rho_l(1 - \varphi)$  посредством датчика истинного объемного паросодержания во всем диапазоне паросодержаний от 0 до 1, решается путем использования высокочувствительного ВЧ-датчика с чувствительным элементом кольцевого поперечного сечения, что позволяет применить гомогенную модель для определения величины  $\rho(\varphi)$  и реализовать измерения величины расхода с приемлемой для практики точностью. Выбор типа ВЧ-датчика паросодержания — кольцевого или кругового сечения — зависит от конкретных технических условий использования расходомера.

Общий массовый расход горизонтального двухфазного потока гелия и равновесные значения расходов его фаз могут быть определены посредством обоснованного соотношения (11), а величины  $G_{\min}$  и  $G_{\max}$  уточняются по месту установки двухфазного расходомера. Дополнительный поправочный коэффициент  $C_{hc}$  за счет возможного кризиса гидравлического сопротивления в СУ можно определить по месту установки двухфазного расходомера с помощью измерительных средств расходомера и известных теплофизических характеристик устройств криостатируемого объекта, которые найдены при их предварительной аттестации.

Оценки относительной неопределенности нахождения расхода гелия  $\delta G_h/G_h$  по соотношению (3) показывают, что при  $T_s = 4.5$  К она может быть в пределах от 1.2% при  $\varphi = 0$  до 1.65% при  $\varphi = 0.8$  и до 2.0% при  $\varphi \approx 0.9$  в рамках сделанных допущений, что требует экспериментальной проверки.

Предложенный подход позволяет создать ряд двухфазных расходомеров гелия с исследованными ВЧ-датчиками кругового и кольцевого поперечных сечений и коническими сужающими устройствами для широкого диапазона значений массовых расходов от примерно 5–6 до более чем 1000 г/с (табл. 1).

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы признательны заместителю директора Лаборатории физики высоких энергий (ЛФВЭ) ОИЯИ Г.Г. Ходжибагиану за полезное обсуждение работы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alexeyev A.I., Filippov Yu.P., Mamedov I.S., Romanov S.V. // *Cryogenics*. 1991. V. 31. P. 1020.  
<https://doi.org/10.1016/0011-2275%2891%2990123-E>
2. Arkharov A.M., Glavatskikh S.B., Grechko A.G., Zherdev A.A. // *Adv. Cryogenic Engin.* 1998. V. 43A. P. 795.  
[https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9047-4\\_99](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9047-4_99)
3. Moerk J.S. et al. Two-phase quality flow meter. USA Patent 5861555. 1999.
4. Ashmore R.H. Two-Phase Cryogenic Flowmeter: A Proof of Concept. The Florida State University. 2006.
5. Filippov Y.P., Panferov K.S. // Proc. 11-th IIR International Conference on Cryogenics. Bratislava, Slovakia. 2010. P. 87.
6. Khodzhibagiyan H.G., Fischer E., Kovalenko A.D. // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2006. V. 16/2. P. 411.  
<https://doi.org/10.1109/TASC.2005.864339>
7. Filippov Y.P. // *Physics Procedia*. 2015. V. 67. P. 1129.  
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.06.175>
8. Filippov Y.P., Panferov K.S. // Proc. of ICEC22. 2008. P. 583.
9. Тоски Э., Хансен Б.В., Смит Д., Теувени Б. // Нефтегазовое обозрение. 2003. С. 68.
10. De Jonge T., Patten T., Rivetti A., Serio L. // Proc. ICEC19. Grenoble, France. 2002. P. 647.
11. Кравченко В., Риккен М. // Законодательная и прикладная метрология. 2006. № 4. С. 37.
12. Monroe E.S., Jr. // *Transactions of ASME*. 1956. V. 78. P. 373.
13. Murdock J.W. Measuring the flow rate of a two-phase flow with orifice plate // *Tech. Mech.* 1962. V. 84(4). P. 8.
14. Filippov Y.P., Panferov K.S. // *Cryogenics*. 2011. V. 51. P. 640.  
<https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2011.09.013>
15. Filippov Y.P., Kakorin I.D., Kovrizhnykh A.M. // *Cryogenics*. 2013. V. 57. P. 55.  
<https://dx.doi.org/10.1016/j.cryogenics.2013.05.004>
16. Филиппов А.Ю., Филиппов Ю.П. // Теплоэнергетика. 2022. № 5. С. 18.  
<https://doi.org/10.1134/S0040363622050010>
17. Филиппов Ю.П., Филиппов А.Ю. // Тепловые процессы в технике. 2021. Т. 13. № 3. С. 98.  
<https://doi.org/10.34759/tpt-2021-13-3-98-110>
18. Filippov Yu.P., Filippov A.Yu. // *Flow Meas. Instrum.* 2019. V. 68. P. 101578.  
<https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2019.101578>
19. Filippov Yu.P., Kakorin I.D., Kovrizhnykh A.M., Miklayev V.M. // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2017. V. 14. N4. P. 602.  
<https://doi.org/10.1134/S1547477117040082>
20. Trubnikov G., Agarov N., Aleksandrov V. et al. // Proc. of EPAC08. Genoa, Italy. 2008. P. 2581.
21. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества. Л.: Машиностроение, 1975.
22. Filippov Yu.P. // *Cryogenics*. 2001. V. 41. P. 327.  
[http://dx.doi.org/10.1016/S0011-2275\(01\)00080-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0011-2275(01)00080-7)
23. Filippov Y.P., Kakorin I.D. // *Cryogenics*. 2016. V. 79. P. 63.  
<https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2016.07.015>
24. Subbotin V.I., Deev V.I., Pridantsev A.I. et al. // *Cryogenics*. 1985. V. 25. P. 261.  
[https://doi.org/10.1016/0011-2275\(85\)90207-3](https://doi.org/10.1016/0011-2275(85)90207-3)
25. Filippov Yu.P. // Proc. of the Low Temperature Engineering and Cryogenics Conference (LTES 90). Southampton, UK, 1990. С. 10.3.1.
26. Нигматулин Б.И., Милашенко В.И., Николаев В.Е. // Теплофизика высоких температур. 1978. Т. 16. С. 1258.
27. Архаров И.А., Какорин И.С. // Измерительная техника. 2020. № 7. С. 34.  
<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-7-34-42>
28. Филиппов А.Ю., Филиппов Ю.П., Коврижных А.М. // ПТЭ. 2023. № 4. С. 132.  
<https://doi.org/10.31857/S0032816223030047>
29. Filippov Yu.P. // *Cryogenics*. 1999. V. 39. P. 59.  
[https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(98\)2900114-3](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(98)2900114-3)
30. Мамедов И.С., Филиппов Ю.П. Структура потоков двухфазного гелия в канале горизонтальной ориентации. Сообщение ОИЯИ. P8-81-40. 1981.
31. Alexeyev A.I., Filippov Yu.P., Mamedov I.S. // *Cryogenics*. 1991. V. 31. P. 330.  
[https://doi.org/10.1016/0011-2275\(91\)90105-6](https://doi.org/10.1016/0011-2275(91)90105-6)
32. Theilacker J.C., Rode C.H. // *Adv. Cryogenic Engineering*. 1988. V. 33. P. 391.  
[https://doi.org/10.1007/978-1-4613-9874-5\\_48](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-9874-5_48)
33. Sauvage-Boutar E., Meuris C., Poivilliers J., Francois M.X. // *Adv. Cryogenic Engineering*. 1988. V. 33. P. 441.  
[https://doi.org/10.1007/978-1-4613-9874-5\\_54](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-9874-5_54)
34. Мамедов И.С., Микляев В.М., Пряничников В.И., Филиппов Ю.П. // Инженерно-физический журнал. 1983. Т. 44. С. 725.
35. Filippov Yu.P. // *Cryogenics*. 1999. V. 39. P. 69.  
[https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(98\)00115-5](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(98)00115-5)
36. Danilov V.V., Filippov Yu.P., Mamedov I.S. // *Adv. Cryogenic Engineering*. 1990. V. 35. P. 745.  
[https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0639-9\\_88](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0639-9_88)
37. Ко Гым Сек, Мамедов И.С., Филиппов Ю.П. Влияние массовой скорости на истинное объемное паросодержание потока двухфазного гелия. Сообщение ОИЯИ. P8-87-505, Дубна, 1987.
38. Селюнин С.Ю., Филиппов Ю.П. // Теплоэнергетика. 1988. № 9. С. 48.

39. Мамедов И.С., Салимов С.Е., Филиппов Ю.П. Режимы течения двухфазного гелия в горизонтальных каналах. Сообщение ОИЯИ, P8-84-505. Дубна, 1984.
40. *Filippov Y.P., Romanov S.V., Panferov K.S., Sveshnikov B.N.* // Proc. of the 22-th International Cryogenic Engineering Conf. (ICEC 22). Seoul, Korea, 2008. P. 419.
41. *Filippov Y.P., Miklayev V.M.* // Cryogenics. 2019. V. 100. P. 85.  
<https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2019.05.001>.
42. Филиппов А.Ю., Филиппов Ю.П., Коврижных А.М. // ПТЭ. 2024. № 2. С. 156.  
<https://doi.org/10.31857/S0032816224020206>
43. *Konstantinov A., Khodzhibagiyan H., Agarov N., Mitrofanova I.* // Proc. of the 14-th cryogenics International Conference. Dresden. Germany, 2017. P. 61. ISSN: 0151.1637, ISBN: 978-2-36215-022-7.
44. *Khodzhibagiyan H., Bleile A., Borisov V., Datskov V., Fischer E., Kostromin S., Mierau A., Nikiforov D.* // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2019. V. 502. P. 012096.  
<http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/502/1/012096>

УДК 621.59

## МИНИМИЗАЦИЯ ПРОБЛЕМ ПРИ СОЗДАНИИ ДВУХФАЗНЫХ РАСХОДОМЕРОВ ДЛЯ КРИОГЕНИКИ И ИХ ОСОБЕННОСТИ. ЧАСТЬ II. ДИАГНОСТИКА ПОТОКОВ ВОДОРОДА И СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

© 2025 г. Ю. П. Филиппов<sup>а</sup>, \*, А. М. Коврижных<sup>а</sup>, А. Ю. Филиппов<sup>б</sup>, \*\*

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

<sup>б</sup> ГлоуБайт / GlowByte  
Россия, 105064, Москва, Нижний Сусальный переулок, 5, с. 19

\* e-mail: fyp@dubna.ru

\*\* e-mail: forsc2231@gmail.com

Поступила в редакцию 12.09.2024 г.

После доработки 09.01.2024 г.

Принята к публикации 20.02.2024 г.

Предложены пути создания двухфазных расходомеров водорода в диапазоне массовых или объемных расходов примерно от 0.2 до 2.5 кг/с или примерно от 10 до 130 м<sup>3</sup>/ч по жидкости, а также сжиженного природного газа (СПГ) – примерно от 5 до 210 кг/с или примерно от 50 до 2100 м<sup>3</sup>/ч. Принцип работы расходомеров основан на комбинации высокочастотных (ВЧ) датчиков паросодержания с равномерным электрическим полем внутри чувствительных элементов различной чувствительности для определения средней плотности двухфазной смеси и конических сужающих устройств для нахождения средней скорости потока. Показана целесообразность использования гамма-плотномеров для двухфазных расходомеров СПГ при относительно больших диаметрах DN ≥ 250. Предложено, как минимизировать проблемы, свойственные подобным двухфазным расходомерам, с учетом опыта по созданию аналогов для гелия. Рассмотрены отличия подходов реализации систем для водорода и СПГ по сравнению с аналогами для двухфазного гелия из-за существенного различия их свойств. Представлены конкретные технические решения двухфазных расходомеров водорода и СПГ в горизонтальных проточных криостатах, которые работоспособны в диапазоне истинных объемных паросодержаний от нуля до примерно 0.9 при относительно небольшом общем гидравлическом сопротивлении тракта расходомеров. Отмечены особенности калибровок ВЧ-датчиков паросодержания при разных равновесных температурах криоагентов. Показаны некоторые недостатки предыдущих подходов к определению расходов СПГ и оценены неопределенности нахождения расходов двухфазных потоков водорода и СПГ.

DOI: 10.31857/S0032816225030161

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Эта статья служит продолжением нашей работы по двухфазным расходомерам для криогеники [1]. Двухфазные расходомеры водорода и сжиженного природного газа (СПГ) могут быть полезны в технологических системах криодиагностических комплексов по производству, хранению и транспортировке этих сжиженных

продуктов, например, для современных систем ракетных двигателей, работающих на паре водород–кислород или метан–кислород, а также на заводах по производству, хранению и распределению СПГ при погрузке и разгрузке как сухопутных, так и морских транспортных средств при возможном изменении агрегатного состояния сжиженного продукта.

Такие комплексы имеют много общего и включают ожижительные установки, крупные накопители сжиженного газа, протяженные криогенные транспортные магистрали сжиженного или двухфазного продукта и его так называемого отпарного газа, установки реконденсации этого газа, а также системы его использования и утилизации [2–4]. Так, наличие измерителя паросодержания после дросселя в ожижителе, как предусмотрено в гелиевой системе с турбодетандерами [5], в сочетании с сужающим устройством позволяет контролировать эффективность процесса ожижения и мгновенно определять производительность процесса, а не находить ее по увеличению уровня в сборнике за сравнительно длительное время с относительно невысокой точностью. В свою очередь, информация по подобным криодиагностическим системам, работающим в сравнительно широком диапазоне паросодержаний, довольно ограничена [6, 7] и иногда противоречива [8]. Отсутствие же в доступной литературе подходящих экспериментальных данных по режимам течения и гидродинамике двухфазных потоков водорода и СПГ, в отличие от данных для двухфазных потоков гелия, затрудняет создание подобных средств диагностики водорода и СПГ.

Как отмечено в работе [1], при разработке криогенных двухфазных расходомеров необходимо учитывать такие проблемы, как влияние разнообразия режимов течения на характеристики сужающего устройства и определение его средней плотности, а также возможные различия между измеренными величинами перепадов давления в сужающем устройстве и ожидаемыми значениями [9, 10], что рассмотрено в работе [1] для гелиевых систем. При этом использованы те же предпосылки, технические требования и принципы, что и при разработке систем для двухфазных потоков гелия сравнительно высокой надежности, основанных на комбинации сужающих устройств (СУ) и емкостных датчиков паросодержания, сигнал которых измеряется высокочастотным (ВЧ) методом [1, 5, 7]. Кроме этого, необходимо учитывать такую особенность двухфазных потоков водорода и СПГ, как их сравнительно высокие отношения плотностей жидкой и паровой фаз, которые могут достигать полутора или двух порядков в зависимости от давления насыщения, тогда как для гелия это отношение не превышает шести при температуре насыщения  $T_s \geq 4.5$  К.

Цель работы состоит в том, чтобы показать принципиальную возможность создания двухфазных расходомеров водорода и СПГ для работы в широком диапазоне истинных объемных паросодержаний (от нуля до примерно 0.8 и, возможно, 0.9) при относительно небольшом общем гидравлическом сопротивлении тракта расходомеров с учетом наработок по двухфазным расходомерам гелия на базе имеющихся испытанных компонентов и проведенных модельных экспериментов, предложить методику расчета массовых расходов и паросодержаний с учетом особенностей теплофизических свойств водорода и СПГ, а также оценить неопределенности установления их расходов.

## 2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ ВОДОРОДА

Как отмечалось, для разработки двухфазных расходомеров водорода на основе комбинации ВЧ-датчиков паросодержания и СУ можно использовать результаты работы [1], в которой показано, что для равновесных потоков гелия влияние разнообразия режимов течения на характеристики СУ и определение его средней плотности можно минимизировать путем обеспечения гомогенизированных режимов течения в обоих сечениях СУ. Напомним, что в этом случае минимизируются и неопределенности нахождения общего массового расхода  $G$  и его компонент, которые могут определяться посредством соотношения [1]

$$G = \xi \left[ \rho_h(\varphi) \cdot \Delta P / C_{hc} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

$$G_g = Gx, \quad G_l = G(1 - x),$$

где  $\xi = A_1 A_2 \left[ 2 / (A_1^2 - A_2^2) \right]^{1/2}$  – геометрический параметр СУ,  $A$  – площадь поперечного сечения, индексы 1 и 2 относятся к большему и меньшему сечениям СУ,  $\Delta P$  – перепад давления через СУ,  $\rho_h(\varphi) = \rho_g \varphi + \rho_l (1 - \varphi)$  – средняя плотность потока в соответствии с гомогенным соотношением (индекс  $h$ ),  $\varphi = A_g / (A_g + A_l)$  – истинное объемное паросодержание,  $x = G_g / (G_g + G_l)$  – расходное массовое паросодержание, индексы  $g$  и  $l$  относятся к паровой/газовой и жидкой фазам потока, поправочный коэффициент определяется формулой  $C_{hc}(\varphi) = \Delta P / \Delta P_h$  [1, 9] по месту установки двухфазного расходомера или на калибровочном стенде. Такой подход оправдан, в частности, и особенностью систем

транспортировки сжиженных криоагентов, которая состоит в необходимости обеспечить максимальные расходы, обусловленные минимумом времени заправки или разгрузки систем и средств хранения или транспортировки потоков сжиженного водорода или СПГ.

В случае двухфазных потоков гелия необходимая для выбора величины  $\xi$  и геометрических размеров компонентов расходомера величина массовой скорости  $m_h = G/A$  оценивалась на основе обширного массива экспериментальных данных по режимам течения и гидродинамическим характеристикам [1]. Однако обнаружить в доступной литературе соответствующие данные для двухфазных потоков водорода в достаточном объеме не удалось. В связи с этим можно воспользоваться следующим подходом, который был опробован в работе [11] с использованием результатов [12–14] при сопоставлении экспериментальных данных по исследованию характеристик двухфазных потоков гелия при давлениях, близких к атмосферному, и воды при относительно высоких давлениях. Так, в работе [11] при анализе влияния массовых скоростей на величины  $\phi$  для гелия была получена необходимая зависимость доли жидкости в паре по отношению ко всей доле жидкости в потоке  $k$  от параметра  $z$ , введенного в работе [13]. При этом зависимость  $k(z)$  получена с использованием экспериментальных данных для пароводяных потоков при давлении 10 МПа [14], когда отношения плотностей сопоставляемых потоков похожи. Безразмерный параметр  $z$  задается формулой  $z = (\rho_g/\rho_l) [\eta_l V_g/(\sigma)]^2$ , где  $\eta_l$  – динамическая вязкость жидкости,  $\sigma$  – поверхностное натяжение,  $V_g$  – средняя скорость равновесного пара. С учетом того, что параметр  $z$  также является функцией величины  $\phi$ , в работе [11] было получено соотношение для  $z$  в общем виде, из которого при использовании гомогенной модели для  $\phi$  [1] следует пропорциональность  $z \propto [\eta_l/(\sigma\rho_g)]^2 (\rho_g/\rho_l) m^2$ . Далее в работе [11] путем сравнения сомножителей этого соотношения для двухфазных потоков гелия при  $P \approx 0.12$  МПа и пароводяных смесей при  $P \approx 13–14$  МПа показано, что параметры  $z$  для этих двух сред будут примерно равны, когда выполняется соотношение

$$m_w \approx 10m_{He}, \quad (2)$$

в котором индексы  $w$  и  $He$  относятся соответственно к воде и гелию. Именно при выполнении соотношения (2) наблюдается сходство гидравлических сопротивлений двухфазных рав-

новесных потоков гелия и пароводяных смесей, отмеченное в работе [12].

Пользуясь рассмотренной аналогией, проверенной сравнением экспериментальных данных для сред с существенно различающимися свойствами, в первом приближении для оценки величины массовой скорости  $m_h$  для двухфазных потоков водорода можно предположить, что характеристики сравниваемых потоков могут быть похожи, если совпадают модернизированные безразмерные комплексы Палеева–Филипповича [13]:

$$PF_m = [\eta_l/\sigma\rho_g]^2 (\rho_g/\rho_l) m^2. \quad (3)$$

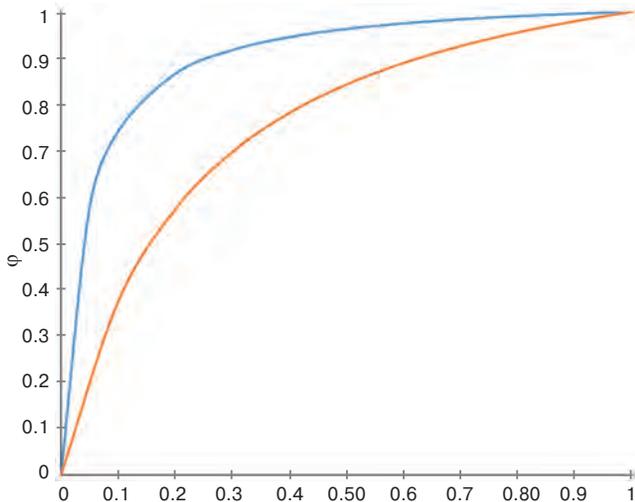
Так, сопоставляя эти комплексы для неизвестного двухфазного потока водорода (индекс  $H_2$ ) и известного аналога для гелия, можно получить следующее искомое соотношение для сравниваемых гомогенных потоков:

$$m_{H_2} \approx 1.8 m_{He}, \quad (4)$$

которое справедливо, в частности, при равновесной температуре  $T_s = 23.0$  К ( $P_s \approx 2.09$  бар) для водорода и  $T_s = 4.5$  К ( $P_s \approx 1.3$  бар) для гелия. Следовательно, при  $m_{He} \approx 175$  кг/(м<sup>2</sup>·с) из работы [1] получается, что гомогенные двухфазные потоки водорода могут существовать при массовых скоростях  $m_{H_2} \geq 315$  кг/(м<sup>2</sup>·с).

Еще одной важной характеристикой для диагностики двухфазных потоков водорода служит гомогенная зависимость  $\phi(x) = [1 + (\rho_g/\rho_l) \cdot (1-x)/x]^{-1}$  [1], где  $x = G_g/(G_g + G_l)$  – расходное массовое паросодержание. Эта характеристика представлена в качестве примера на рис. 1. Выбор температуры насыщения  $T_s = 23.0$  К, соответствующей равновесному давлению  $P_s \approx 2.09$  бар, обусловлен необходимостью создания избыточного давления в системе транспортировки водорода по отношению к атмосферному давлению, а также диапазоном имеющихся экспериментальных данных по калибровке ВЧ-датчика кругового поперечного сечения для двухфазного водорода [15].

Для сравнения здесь же приведена аналогичная характеристика для гелия при  $T_s = 4.5$  К. Рисунок 1 показывает, что зависимость  $\phi(x)$  для водорода располагается существенно выше характеристики для гелия из-за значительной разницы отношений плотностей  $\rho_g/\rho_l$ , которые при указанных величинах  $T_s$  составляют 0.186 и 0.0387 соответственно для гелия и водорода, т.е. различаются почти в 5 раз. В частности, даже при очень малых величинах  $x$  соответствующие

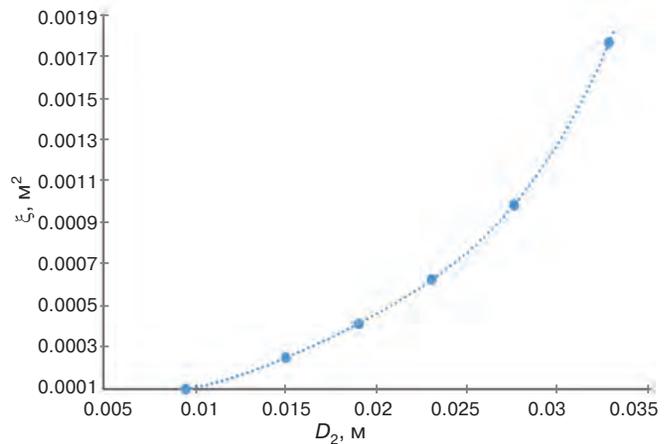


**Рис. 1.** Зависимости истинного объемного паросодержания  $\varphi$  от массового расходного паросодержания  $x$  нормального водорода при температуре насыщения  $T_s = 23.0$  К (верхняя синяя кривая) и гелия при  $T_s = 4.5$  К (нижняя оранжевая линия) для однородных режимов течения.

значения  $\varphi$  для водорода довольно существенны и составляют 0.115 ( $x = 0.005$ ) и 0.207 ( $x = 0.01$ ). Это нужно принимать во внимание при выборе типа ВЧ-датчика паросодержания в зависимости от условий применения, что будет продемонстрировано далее.

Оценим теперь, как переход от гелия к водороду отразится на выборе геометрических размеров СУ. Это можно сделать, сопоставляя выражения  $\xi = (Am) / (\Delta P \rho)^{1/2}$  для гелия и водорода при одинаковых больших сечениях  $A_1$  и минимальном перепаде давления в СУ около  $\Delta P \approx 2$  кПа, при котором устойчиво работают  $\Delta P$ -датчики. Например, для рассмотренного в работе [1] СУ с фиксированным диаметром  $D_1 = 38$  мм эта процедура дает соотношение  $D_1/D_2 \approx 2^{1/2}$  для водорода с учетом выражения (4). Эти результаты можно получить с помощью рис. 2, иллюстрирующего характер влияния СУ меньшего диаметра  $D_2$  на его геометрический фактор  $\xi$  при фиксированном большем диаметре  $D_1 = 38$  мм. В частности, рис. 2 показывает, что увеличение меньшего диаметра  $D_2$  с 9.5 до 27.5 мм приводит к росту величины  $\xi$  на порядок, т.е. в 10 раз. В свою очередь, сравнение одинаковых величин перепадов давления для гелия и водорода показывает, что

$$\xi_{H_2} / \xi_{He} = (m_{H_2} / m_{He}) (\rho_{He} / \rho_{H_2})^{1/2} \approx 2.4. \quad (5)$$



**Рис. 2.** Зависимость геометрического параметра  $\xi$  от меньшего диаметра  $D_2$  конического сужающего устройства при фиксированном большем диаметре  $D_1 = 38$  мм.

В соответствии с рис. 2 величина геометрического фактора СУ 38/19 мм для гелия [1] составляет  $\xi_{He} \approx 4.14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$  при  $D_2 = 19$  мм, следовательно,  $\xi_{H_2} \approx 9.9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ , что соответствует меньшему диаметру СУ для водорода —  $D_2 \approx 27.5$  мм. Таким образом, отношение диаметров СУ для однородных потоков водорода  $D_1/D_2$  составляет  $38/27.5 \approx 1.4 \approx 2^{1/2}$ .

### 3. ДВУХФАЗНЫЕ РАСХОДОМЕРЫ ДЛЯ ВОДОРОДА

Рассмотрение конкретных конструкций двухфазных расходомеров для водорода начнем с варианта, в котором используется ВЧ-датчик кругового поперечного сечения DN 38, представленный в работе [1] в качестве измерителя величины  $\varphi$  для расходомера гелия. Этот ВЧ-датчик отличается пониженной чувствительностью по сравнению с аналогом кольцевого поперечного сечения [1], поэтому такой расходомер предпочтительно использовать в системе, которая работает преимущественно на начальном участке кривой  $\varphi(x)$  на рис. 1 — в диапазоне  $\varphi$  от нуля до примерно 0.9 при  $x \leq 0.25$ .

С учетом представленного выше материала характеристики такого расходомера DN 38 получаются следующими: СУ 38/27.5 мм с углами входного и выходного конусов  $30^\circ$  и  $15^\circ$  соответственно,  $G_{\min} = m_{H_2} A_1 \approx 0.36$  кг/с, или примерно  $19 \text{ м}^3/\text{ч}$  по жидкости, перепад давления на насыщенной жидкости при  $T_s = 23$  К составляет  $\Delta P_l = (G/\xi)^2 / \rho_l \approx 1.95$  кПа, а на двухфазном потоке при  $\varphi = 0.8$  составляет  $\Delta P_{0.8} \approx 8.43$  кПа, что соот-

ветствует разности температур в сечениях СУ  $\Delta T_s < 0.2$  К, когда отличия средних плотностей в сечениях СУ от средней величины, входящей в соотношение (1), весьма незначительны – около  $\pm 0.4\%$ . При вероятной работе на пределе возможностей системы при  $\varphi = 0.95$  величина  $\Delta P_{0.95}$  может возрасти примерно до 22.5 кПа, что соответствует равновесному перепаду температур в сечениях СУ около  $\Delta T_s \approx 0.5$  К при  $T_s = 23$  К. Это сравнительно малая величина для водорода, но возможности реализации этого варианта следует дополнительно проверить на стенде.

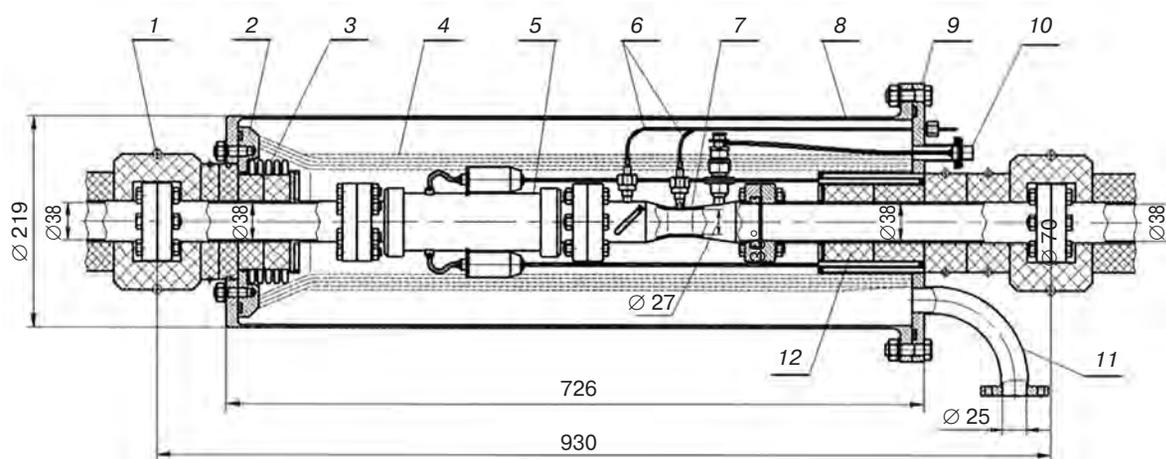
Рассматриваемый вариант сигнальной части расходомера DN 38 размещен в горизонтальном криостате с вакуумной теплоизоляцией, что иллюстрирует рис. 3. Как видно, ВЧ-датчик 5 и СУ 7 присоединены ко входу посредством сильфонного компенсирующего узла 3, приваренного к фланцу 2. Для снижения теплопритоков к низкотемпературной части на выходе использован концентрический тепловой мост 12 с пенополиуретановой теплоизоляцией входных и выходных труб DN 38 из-за сравнительно высокой скрытой теплоты парообразования водорода равной  $r = 427.3$  кДж/кг. В качестве датчиков температуры потока водорода и корпуса СУ предпочтительно использовать тонкопленочные датчики температуры Pt1000 C420, обеспечивающие абсолютную погрешность

измерения около  $\pm 10$  мК [16]. Вывод импульсных трубок 6 СУ, кабелей ВЧ-датчика 5 и датчиков температур осуществляется через выходной фланец 9 с разьемами 10.

Если использовать этот же ВЧ-датчик DN 38 и разместить его в меньшем сечении СУ больших по сравнению с предыдущим случаем размеров – 54/38 мм, то характеристики такого расходомера оцениваются следующими величинами:  $T_s = 23$  К,  $G_{\min} \approx 0.72$  кг/с, или примерно  $38.5$  м<sup>3</sup>/ч по жидкости,  $\Delta P_l \approx 2.27$  кПа,  $\Delta P_{0.8} \approx 9.8$  кПа.

В случае существенно меньших расходов для создания расходомера применяется комбинация ВЧ-датчика кругового сечения, расположенного в узком сечении СУ, например DN 20 длиной  $L = 320$  мм, и СУ 28/20 мм, которые показаны на рис. 4. Так же, как и в предыдущем варианте, ВЧ-датчик соединен с меньшим сечением СУ, а минимальный расход оценивается величиной  $G_{\min} \approx 0.19$  кг/с, или примерно  $9.1$  м<sup>3</sup>/ч по жидкости,  $\Delta P_l \approx 2.09$  кПа,  $\Delta P_{0.8} \approx 9.1$  кПа, т.е. перепады давления на СУ похожи на предыдущий вариант. Углы конусов СУ и расположение импульсных трубок отбора давления на расстоянии полдиаметра от входного конуса такие же, как в работах [1, 17]. В выходном конусе с углом  $15^\circ$  давление частично восстанавливается при расширении двухфазного потока.

Сигнальная часть рассмотренного двухфазного расходомера водорода и его измерительная



**Рис. 3.** Двухфазный расходомер водорода DN 38 в горизонтальном криостате: 1 – входной узел с пенополиуретановой теплоизоляцией, 2 – фланец крепления и уплотнения вакуумного корпуса, 3 – компенсирующий сильфон, 4 – многослойная теплоизоляция, 5 – ВЧ-датчик паросодержания DN 38, 6 – импульсные трубки датчиков давления и перепада давления, 7 – сужающее устройство 38/27 мм, 8 – вакуумный корпус криостата, 9 – фланец крепления и уплотнения вакуумного корпуса с узлами вывода сигналов, 10 – разъем датчиков температуры потока и корпуса Pt1000 C420, 11 – патрубок вакуумной откачки криостата, 12 – концентрический тепловой мост с теплоизоляцией из пенополиуретана.

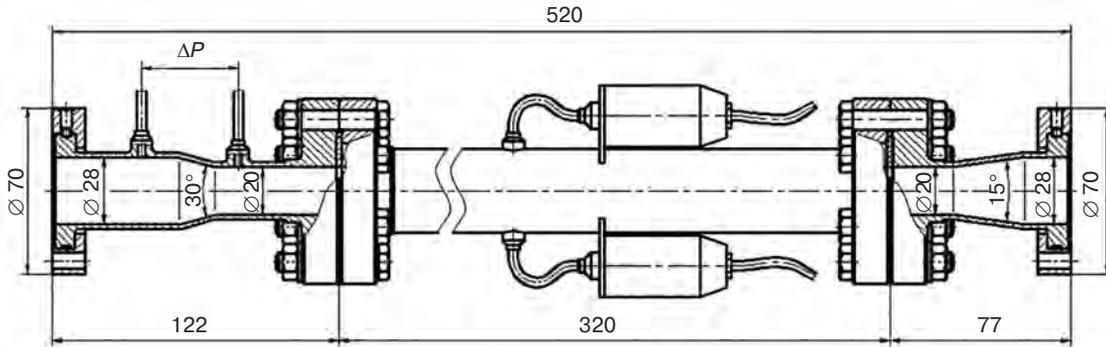


Рис. 4. Низкотемпературная сигнальная часть двухфазного расходомера водорода: комбинация сужающего устройства 28/20 мм и ВЧ-датчика DN 20, расположенного в узком сечении СУ.

система на базе 6-слотового промышленного компьютера (ПК) представлены на рис. 5, на заднем плане которого показан 6-слотовый ПК с платами измерения (слева направо) резонансной частоты  $f$ , давления и перепада давления, температур потока и корпуса; USB-панель, процессорная плата РСА-6763VG и плата 8-канального ЦАПа, лежащая рядом с ПК; слева от ВЧ-датчика расположен выносной ВЧ-детектор. Криостат для этой низкотемпературной сборки выполняется по аналогии с вариантом, представленным на рис. 3.

Оценочные характеристики ВЧ-датчика DN 20 длиной  $L = 320$  мм при  $T_s = 23$  К следующие:  $f_g \approx 37.00$  МГц,  $f_l \approx 36.50$  МГц, сигнальный диапазон  $\Delta f = f_g - f_l = 0.50$  МГц, а инструментальная погрешность [1] составляет  $\delta\varphi_{instr} = 2\delta f_{instr} / \Delta f \approx \pm 0.1\%$  при неопределенно-

сти измерения резонансной частоты  $\delta f_{instr} = \pm 0.25$  кГц. Подробности и особенности процедуры калибровки и определения величины  $\varphi(f)$  представлены ниже в разд. 4.

Если нужно работать при том же расходе  $G_{min} \approx 0.19$  кг/с и относительно больших массовых расходных паросодержаниях  $x$ , например в диапазоне  $0.25 \leq x \leq 0.4$ , когда  $0.9 \leq \varphi \leq 0.95$ , то можно использовать вариант более чувствительного кольцевого ВЧ-датчика с внешним диаметром  $D = 70$  мм и кольцевым зазором  $\delta = 1.5$  мм [18]. Так, рис. 1 показывает, что в точке  $x \approx 0.4$  и  $\varphi \approx 0.95$  производная  $d\varphi/dx \approx 0.2$  для водорода примерно равна производной для гелия в диапазоне  $0.9 \leq x \leq 1.0$  при  $0.98 \leq \varphi \leq 1.0$ . В качестве измерителя средней скорости двухфазного водорода в этом случае также подходит СУ 28/20 мм с примерно равными сечениями меньшего диаметра СУ и кольцевого зазора ВЧ-датчика. При этом оцененные перепады давления на СУ составляют  $\Delta P_l \approx 2.09$  кПа,  $\Delta P_{0.8} \approx 9.1$  кПа и  $\Delta P_{0.95} \approx 24$  кПа.

Для обеспечения относительно больших расходов, превышающих 1 кг/с, применяется аналог ВЧ-датчика двухфазного водорода кругового поперечного сечения DN 71 длиной  $L = 220$  мм, который представлен в работе [15]. В паре с этим ВЧ-датчиком целесообразно использовать СУ 71/51 мм, а основные характеристики расходомера оцениваются следующими величинами:  $G_{min} \approx 1.25$  кг/с, или примерно  $67$  м<sup>3</sup>/ч по жидкости,  $\Delta P_l \approx 2.03$  кПа,  $\Delta P_{0.8} \approx 8.8$  кПа.

Еще один вариант расходомера с ВЧ-датчиком DN 71, но расположенным в меньшем сечении СУ 100/71 мм, способен обеспечить расход потока водорода  $G_{min} \approx 2.5$  кг/с, или примерно  $132$  м<sup>3</sup>/ч по жидкости при  $\Delta P_l \approx 2.16$  кПа,  $\Delta P_{0.8} \approx 9.35$  кПа и  $T_s = 23$  К. При таком минимальном расходе сосуд для жидкого водорода объемом,



Рис. 5. Низкотемпературная сигнальная часть двухфазного расходомера водорода  $G_{min} \approx 0.19$  кг/с — комбинация конического сужающего устройства 28/20 мм и ВЧ-датчика кругового сечения DN 20 с измерительной системой на базе промышленного компьютера.

**Таблица 1.** Оценочные характеристики двухфазных расходомеров водорода при  $T_s = 23$  К на базе комбинации ВЧ-датчиков паросодержания и сужающих устройств

Тип ВЧ-датчика	Размеры ВЧ-датчика, мм	Размеры СУ, $D_1/D_2$ , мм	$G_{\min}$ , кг/с	$\Delta P_t$ , кПа	$\Delta P_{0.8}$ , кПа
Круговой	$D = 20$	28/20	0.19	2.09	9.1
Кольцевой	$D = 70, \delta = 1.5$	28/20	0.19	2.09	9.1
Круговой	$D = 38$	38/27.5	0.36	1.95	8.43
Круговой	$D = 38$	54/38	0.72	2.27	9.8
Круговой	$D = 71$	71/51	1.25	2.03	8.8
Круговой	$D = 71$	100/71	2.5	2.16	9.35

например  $1500 \text{ м}^3$ , может быть заполнен примерно за 11 ч, что далеко не предел для такого расходомера.

В табл. 1 представлены основные характеристики всех рассмотренных двухфазных расходомеров водорода при  $T_s = 23$  К на основе имеющихся ВЧ-датчиков паросодержания.

Как отмечалось, для использования соотношения (1) при определении расхода водорода нужно найти поправочный коэффициент  $C_{hc}(\varphi) = \Delta P / \Delta P_h$  [1, 9]. Так же, как и для случая с гелием, это может быть сделано на калибровочном стенде или по месту установки двухфазного расходомера, если в магистрали установлен расходомер Кориолиса или другое измерительное устройство, работающее при температуре насыщения или в состоянии недогретой до насыщения жидкости.

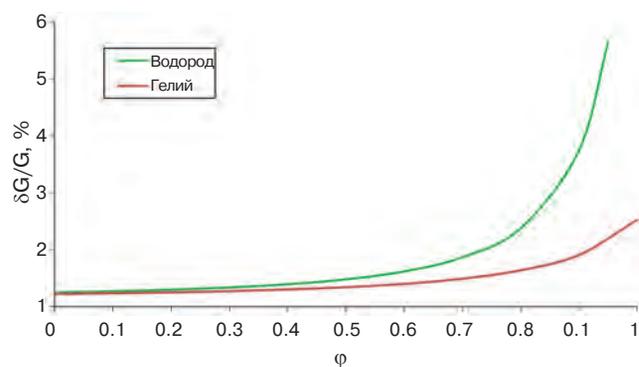
Что касается неопределенности определения расхода двухфазного водорода посредством рассмотренных устройств, то эту характеристику можно оценить, используя то же соотношение, что и для гелиевых аналогов при гомогенных режимах течения [1, 19]:

$$\delta G / G_h [\%] = \left\{ C + \left[ 0.5 \delta \varphi (\rho_l - \rho_g) / \rho(\varphi) \right]^2 \right\}^{1/2}, \quad (6)$$

в котором коэффициент  $C \approx 1.33$  зависит от характеристик использованных устройств, принятых для оценки неопределенности величины  $\xi$  в соотношении (1) [19]:  $\delta G_0 / G_0 \approx 1\%$  в случае применения расходомера Кориолиса для этой цели,  $\delta \Delta P / \Delta P = 0.25\%$  для стандартного датчика перепада давления Сапфир-22 МПС и  $\delta \rho_0 / \rho_0 = 0.5\%$  при нахождении плотностей  $\rho_l$  и  $\rho_g$  из таблиц. При определении влияния перепада давления  $\Delta P$  в формуле (1) нужно учесть вклад величины  $\delta \Delta P / \Delta P \approx 1\%$  при усреднении

перепада давления  $\Delta P$  из-за колебаний давления в двухфазном потоке водорода. Что касается вклада, связанного со средней плотностью  $\rho(\varphi)$  в соотношении (1) при  $C_{hc} = 1$ , то, как показано в работе [19], его можно оценить выражением  $\delta \rho = (\rho_l - \rho_g) \delta \varphi$ , где максимальная абсолютная ошибка измерения паросодержания ВЧ-датчиком кольцевого сечения не превышает значения  $\delta \varphi \approx 1\%$  [1].

Оценки по соотношению (6) представлены на рис. 6, результаты которого рассматриваются в качестве первого приближения. Так, при  $T_s = 23$  К величины  $\delta G / G_h$  для двухфазного расходомера водорода могут составлять  $\pm 1.25\%$  ( $\varphi_h = 0$ ),  $\pm 1.5\%$  ( $\varphi_h = 0.5$ ),  $\pm 2.4\%$  ( $\varphi_h = 0.8$ ),  $\pm 3.8\%$  ( $\varphi_h = 0.9$ ) и  $\pm 5.7\%$  ( $\varphi_h = 0.95$ ). По сравнению с аналогичной характеристикой для двухфазного расходомера гелия [1] эти данные довольно похожи в диапазоне  $\varphi_h$  от 0 примерно до 0.6, что связано с поведением отношений  $(\rho_l - \rho_g) / \rho(\varphi)$  для сравниваемых веществ. Однако при  $\varphi_h = 0.8$



**Рис. 6.** Расчетная оценка зависимостей относительной неопределенности нахождения расхода  $\delta G / G$  от истинного объемного паросодержания водорода  $\varphi_h$  при  $T_s = 23$  К и гелия при  $T_s = 4.5$  К для комбинации ВЧ-датчика кольцевого сечения и конического СУ.

величина  $\delta G/G_h$  для водорода превышает соответствующее значение для гелия примерно в 1.5 раза, а при  $\varphi_h = 0.95$  – в 2.7 раза. В соответствии с соотношением (6) зависимости  $\delta G/G(\varphi_h)$  несколько снижаются с ростом равновесной температуры и повышаются с падением величины  $T_s$ , что связано с характером кривых  $\rho_l(T_s)$  и  $\rho_g(T_s)$ .

Двухфазные расходомеры и ВЧ-датчики паросодержания водорода могут работать в технологических системах при разных температурах  $T_s$ , а их характеристики имеют особенность, которую отметим, кратко напомнив процедуру калибровки (это было анонсировано в нашей работе [1], касающейся двухфазных гелиевых расходомеров).

#### 4. ОСОБЕННОСТИ КАЛИБРОВКИ КРИОГЕННЫХ ВЧ-ДАТЧИКОВ ПАРСОДЕРЖАНИЯ

Система калибровки ВЧ-датчиков паросодержания криоагентов, в частности гелия, водорода и азота, была представлена в работе [15]. Суть процедуры калибровки состоит в том, что при постоянной равновесной температуре  $T_s$ , величина истинного объемного паросодержания  $\varphi$  определяется соотношением [1, 15, 18]

$$\varphi = \left[ \varepsilon_l - (K_3 - K_1 f^2) / (K_2 f^2 - 1) \right] / (\varepsilon_l - \varepsilon_g), \quad (7)$$

где  $f$  – резонансная частота ВЧ-датчика, зависящая от степени его заполнения,  $\varepsilon_l$  и  $\varepsilon_g$  – диэлектрические проницаемости компонент,  $K_i$  – калибровочные коэффициенты. Количество калибровочных коэффициентов для конфигурации кругового поперечного сечения равно трем, а для датчиков кольцевого сечения – двум [1, 15, 18]. Калибровка производится в специально оборудованном криостате (рис. 7), куда помещается калибруемый ВЧ-датчик, который в соответствии с рекомендациями патента [20] заполняется последовательно равновесными жидкостью и паром при одинаковой температуре  $T_s$ , изменяющейся в зависимости от требуемых условий. В случае водорода предусмотрена его конденсация в специальном теплообменнике посредством жидкого гелия, подаваемого из сосуда Дьюара [15].

В процессе калибровки с водородом использовались железо-родиевый датчик температуры RIRT-2 производства ВНИИФТРИ с погрешностью  $\pm 10$  мК, ПИД-регулятор для поддержания

постоянного давления с максимальным отклонением  $\pm 300$  Па и система измерения резонансной частоты с инструментальной погрешностью  $\delta f_{inst} = \pm 0.5$  кГц [15, 21].

Однако, поскольку ВЧ-датчик чувствителен не только к веществу внутри его объема, но и к зависящим от температуры свойствам материалов, из которых он сделан, необходимо ввести дополнительную поправку. Это сделано таким образом [21], что для водорода величина  $f$  в соотношении (7) представлена в температурно-зависимом виде

$$f = f^* + (T_s - T_0) C, \quad (8)$$

где  $f^*$  – измеренная резонансная частота,  $T_0$  и  $C$  – температурная и частотная константы для конкретного ВЧ-датчика. Соотношение (8) – это так называемая вакуумная зависимость, определяемая с пустым ВЧ-датчиком при заданной температуре  $T_s$ , когда внутри него создан вакуум с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_v = 1$ . В общем случае зависимость  $f(f^*, T_s)$



Рис. 7. ВЧ-датчик кольцевого сечения с внешним диаметром  $D = 70$  мм и зазором  $\delta = 1.5$  мм, подготовленный для калибровки с гелием и азотом при различных температурах  $T_s$ .

может быть квадратичной, что характерно для гелия [22].

На основе полученных экспериментальных данных рассчитываются коэффициенты  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$ , зависящие от трех резонансных частот,  $f_l$ ,  $f_g$ ,  $f_v$ , и трех диэлектрических проницаемостей,  $\varepsilon_l$ ,  $\varepsilon_g$ ,  $\varepsilon_v$ , где индекс  $v$  относится к вакууму. Для отмеченного ВЧ-датчика кругового сечения DN 71 длиной  $L = 220$  мм калибровочные характеристики таковы [15, 21]: диапазон калибровки от 20.23 до 23.28 К,  $T_0 = 22.26$  К,  $C = 7.07$  кГц/К,  $K_1 = 2.68316 \cdot 10^{-4}$ ,  $K_2 = 7.86893 \cdot 10^{-4}$ ,  $K_3 = 6.74095 \cdot 10^{-1}$ ; в частности, при  $T_s = 22.77$  К резонансные частоты  $f_g = 39.8055$  МГц,  $f_l = 39.2700$  МГц,  $\Delta f = 0.5355$  МГц, а  $\delta\varphi_{instr} = 2\delta f_{instr} / \Delta f < \pm 0.2\%$ . Отметим, что в случае с водородом практически определяется величина  $\varphi$ , поскольку выполняется соотношение  $(\varepsilon_l - \varepsilon_g) / \varepsilon_g \approx 0.2 \ll 1$ , хотя и несколько хуже, чем для гелия.

В качестве примера на рис. 7 показан упомянутый выше ВЧ-датчик кольцевого поперечного сечения с внешним диаметром кольца  $D = 70$  мм и зазором  $\delta = 1.5$  мм, подготовленный для калибровки при различных температурах гелия и азота. На основе полученных экспериментальных данных оценены основные характеристики этого прибора для водорода при  $T_s = 23$  К:  $f_g \approx 88.2$  МГц,  $f_l \approx 81.28$  МГц,  $\Delta f \approx 6.92$  МГц,  $\delta\varphi_{inst} = 2\delta f_{inst} / \Delta f < \pm 0.01\%$  при неопределенности измерения частоты  $\delta f_{inst} = \pm 0.25$  кГц, т.е. на порядок лучше по сравнению с предыдущим вариантом ВЧ-датчика кругового поперечного сечения.

## 5. ДВУХФАЗНЫЕ РАСХОДОМЕРЫ ДЛЯ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

Для разработки двухфазных расходомеров СПГ на основе комбинации ВЧ-датчиков паросодержания и СУ можно использовать предыдущие результаты по аналогичным системам для водорода, которые имеют довольно много общего, что отмечено во введении. В частности, для двухфазных расходомеров СПГ влияние разности режимов течения на характеристики СУ и определение его средней плотности можно минимизировать путем обеспечения гомогенизированных режимов течения в обоих сечениях СУ. При этом минимизируются и неопределенности нахождения массового расхода  $G$ , который также может определяться по соотноше-

нию (1). Что касается выбора рабочего давления, то в соответствии с данными работ [2, 4] в первом приближении остановимся на равновесной температуре  $T_s = 145$  К, которая соответствует давлению  $P_s = 8.21$  бар для метана и хорошо согласуется, в частности, с давлением насосов в танкерах СПГ от 0.7 до 1 МПа (7–10 бар) [4]. Кроме того, при этом давлении отношения плотностей  $\rho_g / \rho_l$  для СПГ и водорода при  $T_s = 23$  К весьма похожи, и для анализа и сравнения результатов можно воспользоваться данными, представленными на рис. 1 и 6.

Для нахождения необходимой величины массовой скорости  $m_{LNG}$ , при которой возможна реализация гомогенных режимов течения двухфазных потоков СПГ, воспользуемся предложенным выше подходом при определении аналогичной величины для водорода  $m_{H_2}$ , поскольку обнаружить в доступной литературе соответствующие данные для двухфазных потоков СПГ в достаточном объеме также не удалось. Так, сопоставляя безразмерные комплексы (3) для неизвестного двухфазного потока СПГ и известного аналога для гелия, можно получить следующее искомое соотношение:

$$m_{LNG} \approx 7.5 m_{He}, \quad (9)$$

которое справедливо при равновесных температурах  $T_s = 145$  К ( $P_s = 8.21$  бар) для СПГ и  $T_s = 4.5$  К ( $P_s \approx 1.3$  бар) для гелия. Следовательно, существование гомогенных двухфазных потоков СПГ оценивается величинами массовых скоростей  $m_{LNG} \geq 1300$  кг/(м<sup>2</sup>с), поскольку  $m_{He} \approx 175$  кг/(м<sup>2</sup>с) [1].

При определении конфигураций двухфазных расходомеров СПГ традиционно начнем с варианта применения ВЧ-датчика DN 38 [1], который работоспособен при любых температурах от 2 до 300 К. Оценку выбора геометрических размеров СУ при переходе от гелия на СПГ можно сделать так же, как для случая с водородом, сопоставляя выражения  $\xi = (Am) / (\Delta P \rho)^{1/2}$  для гелия и СПГ при одинаковых больших сечениях  $A_1$  и минимальных перепадах давления в СУ около  $\Delta P \approx 2$  кПа. Эта процедура дает соотношение

$$\xi_{LNG} / \xi_{He} = (m_{LNG} / m_{He}) (\rho_{He} / \rho_{LNG})^{1/2} \approx 4.27. \quad (10)$$

В соответствии с рис. 2 величина геометрического фактора СУ 38/19 мм для гелия составляет  $\xi_{He} = 4.14 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup> при  $D_2 = 19$  мм, следовательно,  $\xi_{LNG} \approx 17.7 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>, что соответствует меньшему диаметру СУ для СПГ,  $D_2 \approx 32$  мм, т.е. отноше-

ние диаметров СУ для СПГ  $D_1/D_2$  составляет  $38/32 \approx 1.2 \approx 2^{1/4}$ .

Соотношения типа (9) и (10) для СПГ и (4) и (5) для водорода на основе безразмерного комплекса (3), вероятно, можно использовать для предварительной оценки характеристик при создании двухфазных расходомеров кислорода, азота, неона и др.

Характеристики двухфазного расходомера для СПГ DN 38 оцениваются следующими величинами: СУ 38/32 мм с углами входного и выходного конусов  $30^\circ$  и  $15^\circ$  соответственно,  $G_{\min} = m_{\text{LNG}} A_1 \approx 1.5$  кг/с, или примерно  $14.4$  м<sup>3</sup>/ч по жидкости, перепад давления на насыщенной жидкости при  $T_s = 145$  К составляет  $\Delta P_l = (G/\xi)^2/\rho_l \approx 2.27$  кПа, а на двухфазном потоке при  $\varphi = 0.8$  равен  $\Delta P_{0.8} \approx 9.96$  кПа, что соответствует разности температур в сечениях СУ  $\Delta T_s < 0.3$  К, когда отличия средних плотностей в сечениях СУ от средней величины, входящей в соотношение (1), практически одинаковы. При возможной работе расходомера при  $\varphi = 0.9$  величина  $\Delta P_{0.9}$  может возрасти примерно до 17.3 кПа, что соответствует равновесному перепаду температур в сечениях СУ около  $\Delta T_s \approx 0.5$  К. Это относительно небольшая величина для СПГ при  $T_s = 145$  К, но возможности реализации этого варианта лучше дополнительно проверить на стенде.

Вариант сигнальной части расходомера СПГ для существенно большего расхода представлен на рис. 8. Характеристики такого расходомера DN 70 следующие: СУ 70/58 мм с входным и выходным конусами  $30^\circ$  и  $15^\circ$  соответственно,  $G_{\min} = m_{\text{LNG}} A_1 \approx 5$  кг/с, или примерно  $49$  м<sup>3</sup>/ч по жидкости, перепад давления на насыщенной жидкости при  $T_s = 145$  К составляет

$\Delta P_l = (G/\xi)^2/\rho_l \approx 2.58$  кПа, а на двухфазном потоке при  $\varphi = 0.8$  равен  $\Delta P_{0.8} \approx 11.3$  кПа, т.е. величины перепадов мало отличаются от предыдущего варианта. В конструкции на рис. 8 узел датчика температуры потока Pt1000 С420 [16] с разъемом размещен на выходном конусе СУ.

Дальнейшее использование подобной конструкции с целью значительного повышения величины расхода представляется затруднительным по причинам, связанным с особенностями чувствительного элемента ВЧ-датчика, основной элемент которого показан на рис. 9. Это керамическая труба DN 70 из материала ВК-94, соединенная с коваровыми переходниками посредством пайки медью в печи в атмосфере водорода. На керамическую трубу посредством специально подобранных клея и оснастки наносится меандровая линия из медной проволоки для создания равномерного электрического поля внутри чувствительного объема. Изготовленная таким же способом металлокерамическая труба DN 38 была использована для гелиевого [1] и водородного ВЧ-датчиков (последний показан на рис. 3).

Как видно, процесс создания чувствительного узла ВЧ-датчика требует широкого круга специального оборудования, в том числе станков с алмазными режущими инструментами, а иногда и литьевых форм для создания керамических заготовок нужного размера, и этот процесс сопровождается сравнительно большими затратами. Необходимость же его использования связана с проблемой пористости альтернативных диэлектрических материалов, в частности стеклотекстолитов некоторых марок с подходящими температурными усадками, что, в свою очередь, может приводить к нестабильно-

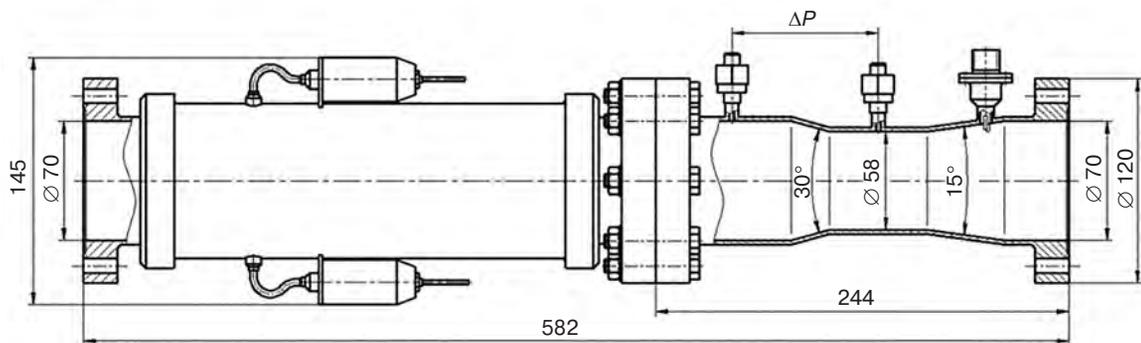


Рис. 8. Сигнальная часть двухфазного расходомера СПГ с  $G_{\min} \approx 5$  кг/с или около  $49$  м<sup>3</sup>/ч по жидкости: комбинация ВЧ-датчика кругового поперечного сечения DN 70 и конического сужающего устройства 70/58 мм с узлом датчика температуры потока на выходном конусе.



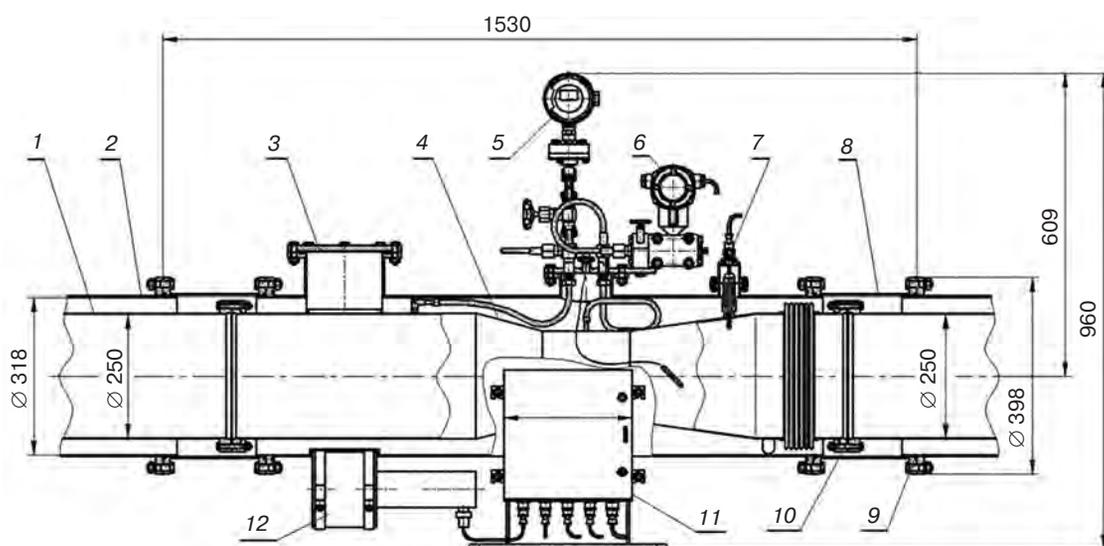
**Рис. 9.** Основа для создания чувствительной части ВЧ-датчика кругового поперечного сечения DN 70 – комбинация труба из ковара и керамики ВК-94.

сти работы при сравнительно длительном заполнении пор диэлектрика криогенной жидкостью или ее удалении при контакте поверхности с газовой фазой с соответствующим изменением диэлектрических свойств конструкции в целом. Кроме того, внешние габариты ВЧ-датчика, например DN 120, не позволяют разместить его по крайней мере в имеющемся криостате для калибровки с внутренним диаметром 250 мм, как на рис. 7.

Отметим также, что при диагностике двухфазных потоков СПГ ВЧ-датчик, в принципе, измеряет величину, пропорциональную  $\varphi$ , а не ее саму, поскольку необходимое соотношение  $(\epsilon_l - \epsilon_g) / \epsilon_g \approx 0.6 \ll 1$  уже не выполняется. В этом случае необходима соответствующая коррекция, которую можно выполнить на метрологическом стенде, что может быть сделано одновременно с нахождением параметра  $C_{hc}$  в соотношении (1).

Вариант двухфазного расходомера для СПГ, основанный на другом принципе определения средней плотности или паросодержания, в котором учтены соотношения (9) и (10), представлен на рис. 10. В этом случае использован метод определения средней плотности с помощью гамма-плотномера ( $\gamma$ -плотномера), который был испытан и представлен в работах [7, 9, 10, 17, 23], а предварительный упрощенный вариант двухфазного расходомера СПГ с  $\gamma$ -плотномером приведен в работе [7].

В соответствии с версией, представленной на рис. 10, СУ 4 диаметрами 250/208 мм смонтировано в трубе 1 DN 250 для СПГ [24] посредством холодных уплотнений 10 с компенсирующим сильфоном на выходе потока из СУ. Углы конусов использованы такие же, как на рис. 8, а именно 30° и 15°. Для монтажа СУ предусмотрена пара сдвижных муфт 8 на вакуумном корпусе 2. В качестве блока  $\gamma$ -источника 3 с изотопом  $^{137}\text{Cs}$  активностью 17 мКи [7] исполь-



**Рис. 10.** Двухфазный расходомер для СПГ с вакуумной теплоизоляцией: 1 – входная труба DN 250, 2 – труба вакуумного корпуса, 3 – блок  $^{137}\text{Cs}$ - $\gamma$ -источника, 4 – коническое сужающее устройство 250/208 мм, 5 – преобразователь давления, 6 – преобразователь перепада давления, 7 – узел вывода тонкопленочного датчика температуры потока Pt1000 [16], 8 – сдвижная монтажная муфта, 9 – уплотнение вакуумного корпуса, 10 – низкотемпературное уплотнение магистрали СПГ с компенсирующим сильфоном, 11 – корпус промышленного компьютера во взрывобезопасном исполнении, 12 – блок  $\gamma$ -детектора.

зается часть стандартного блока БГИ-50П [25], а в качестве приемника излучения —  $\gamma$ -детектор 12 из работы [23] с относительной погрешностью измерения зарегистрированной интенсивности излучения  $\delta I/I \approx 0.25\%$  [23].

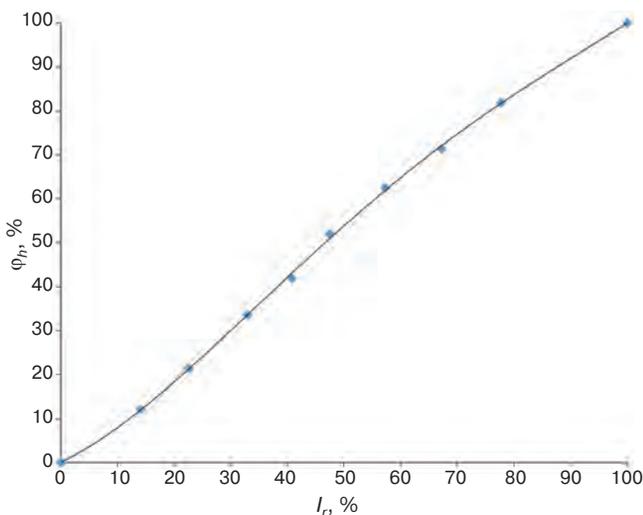
Работа электроники расходомера на базе промышленного компьютера 11 подробно описана в работе [23]. В качестве датчиков давления 5 и перепада давления 6 используются стандартные преобразователи Сапфир-22 МПС класса 0.25. Для стыковки конструкции расходомера с общей магистралью для СПГ с внешним 12-дюймовым вакуумным корпусом (305 мм) [24] предусмотрены конические переходники 318/305 мм, не показанные на рис. 10.

В случае применения  $\gamma$ -плотнмера среднюю плотность  $\rho(\varphi_h)$  в соотношении (1) можно определить двумя путями. Первый способ — посредством закона Ламберта—Бэра:

$$I = I_0 \exp[-(\mu/\rho)\rho D], \quad (11)$$

где  $I$  — зарегистрированная интенсивность  $\gamma$ -излучения,  $I_0$  — интенсивность  $\gamma$ -излучения, когда труба внутренним диаметром  $D$  пуста,  $\mu/\rho$  — массовый коэффициент ослабления СПГ, который можно найти экспериментально или из соответствующих таблиц,  $\rho$  — средняя плотность, измеренная по диаметру трубы, — так называемая линейная плотность [7].

Другой путь — на основе результатов испытаний на стенде — иллюстрирует рис. 11. На этом



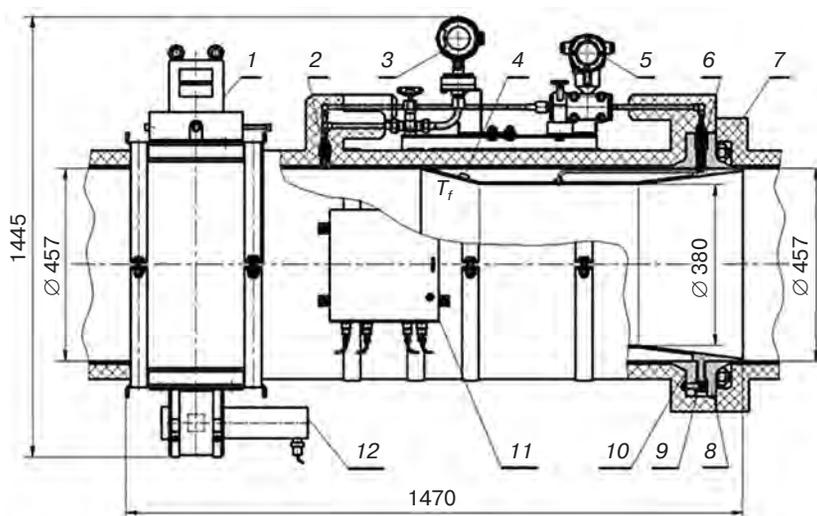
**Рис. 11.** Зависимость величины  $\varphi_h$  от относительного сигнала  $\gamma$ -плотнмера  $I_r = 1 - \ln(I_g/I) / \ln(I_g/I_w)$  на основе данных стенда фирмы TUV SUD NEL для двухфазного потока вода—азот при комнатной температуре, давлении 5 бар и объемном расходе воды  $Q_w = 40 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

рисунке в качестве примера представлена безразмерная зависимость  $\varphi_h(I_r)$  для потока вода—сжатый газ, просвечиваемого/облучаемого (гамма-лучами) в трубе внутренним диаметром 101.6 мм [17], где  $I_r = 1 - \ln(I_g/I) / \ln(I_g/I_w)$ , величина  $I$  соответствует текущей измеренной интенсивности  $\gamma$ -плотнмера при заданной стендом величине  $\varphi_{tb}$ . Полученная зависимость  $\varphi_h(I_r)$ , вид которой не меняется с ростом расхода воды  $Q_w \geq 40 \text{ м}^3/\text{ч}$  [17], позволяет найти необходимую величину  $\varphi_h$  с максимальным отклонением от показаний стенда  $\delta\varphi = \varphi_h - \varphi_{tb} \approx 1.1\%$  в единственной точке  $\varphi_{tb} = 41.9\%$ .

Похожим образом с характерным легким перегибом примерно в середине графика выглядит и размерная зависимость  $\varphi_h(I)$ . Сравнение результатов расчетов по полиному четвертой степени с данными стенда показывает, что абсолютная ошибка  $\delta\varphi$  не превышает преимущественно величины 1%. Отметим, что во время измерений на стенде TUV SUD NEL  $\gamma$ -плотнмер с длительностью измерения сигнала 0.1 с был настроен не оптимально, и при увеличении этого параметра до 1 с, что рекомендовано в работе [23], отмеченную погрешность  $\delta\varphi$  можно улучшить, по крайней мере, до  $\delta\varphi < 1\%$ , что вполне приемлемо для подобных измерений. При этом для оценки неопределенности измерения расхода двухфазного потока СПГ можно пользоваться соотношением (6) и данными рис. 6 для водорода при  $T_s = 23 \text{ К}$ , поскольку при  $T_s = 145 \text{ К}$  для СПГ отношения плотностей этих веществ практически одинаковы, а соответствующая разница в величинах  $\varphi_h$  составляет всего 0.018, например при  $x = 0.1$ .

Основные характеристики рассматриваемого двухфазного расходомера для СПГ DN 250 следующие: СУ 250/208 мм,  $G_{\min} = m_{\text{LNG}}A_1 \approx 64 \text{ кг/с}$ , или примерно  $674 \text{ м}^3/\text{ч}$  по жидкости, перепад давления на насыщенной жидкости при  $T_s = 145 \text{ К}$  составляет  $\Delta P_l = (G/\xi)^2/\rho_l \approx 2.5 \text{ кПа}$ , а на двухфазном потоке при  $\varphi = 0.8$  равен  $\Delta P_{0.8} \approx 11.0 \text{ кПа}$ , что примерно соответствует предыдущему варианту на рис. 8. Величину  $G_{\min}$  можно увеличить на 40–50%, т.е. примерно до  $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$  с повышением перепада давления на СУ до  $\Delta P_l \approx 5.5 \text{ кПа}$ .

Вариант расходомера СПГ на значительно большие значения расхода представлен на рис. 12. Его внутренний диаметр согласуется с размерами магистрали для СПГ диаметром 450 мм и длиной 9 км, приведенными в работе [3].



**Рис. 12.** Двухфазный расходомер для СПГ на основе комбинации  $^{137}\text{Cs}$ -гамма-плотномера и конического СУ 457/380: 1 – блок  $^{137}\text{Cs}$ - $\gamma$ -источника, 2 – вход датчиков давления и перепада давления, 3 – датчик давления, 4 – датчик температуры потока и корпуса Pt1000, 5 – датчик перепада давления, 6 – выход датчика перепада давления, 7 – пенополиуретановая теплоизоляция, 8 – фланец магистрали СПГ, 9 – промежуточный монтажный фланец, 10 – фланец двухфазного расходомера, 11 – блок электроники во взрывозащищенном исполнении, 12 –  $\gamma$ -детектор с кристаллом ВГО во взрывозащищенном исполнении.

Особенность разработанной конструкции состоит в том, что ее коническое СУ 457/380 мм (18/15 дюймов) с датчиком 4 температуры потока и корпуса СУ с отрицательной импульсной трубкой 6 смонтированы на промежуточном фланце 9, который с обеих сторон уплотняется с фланцами 8 и 10 при монтаже СУ двухфазного расходомера в магистрали СПГ. Положительная импульсная трубка 2 конического СУ врезана в магистраль СПГ. Датчики давления 3 и перепада давления 5, а также блок промышленного компьютера 11 с измерительной электроникой используются те же, что и в конструкции, показанной на рис. 10. Гамма-плотномер включает блок  $^{137}\text{Cs}$ - $\gamma$ -источника 1, выполненного на основе стандартной конструкции БГИ-50П [25] с затвором “открыть/закрыть”, и спектрометрический  $\gamma$ -детектор 12 с температурной стабилизацией пика поглощения  $^{137}\text{Cs}$  активностью около 17 мКи [23]. Блоки  $\gamma$ -плотномера фиксируются снаружи магистрали СПГ посредством разъемного бандажа. В принципе блок БГИ-50П предполагает использование разных  $\gamma$ -источников с активностями до 200 мКи [25]. Теплоизоляция магистрали СПГ с двухфазным расходомером предполагалась из радиационно-стойкого пенополиуретана (его толщина показана условно).

Основные характеристики предложенного двухфазного расходомера для СПГ следующие: СУ 457/380 мм,  $G_{\min} = m_{\text{LNG}} A_1 \approx 213$  кг/с, или

примерно 2090 м<sup>3</sup>/ч по жидкости, перепад давления на насыщенной жидкости при  $T_s = 145$  К составляет  $\Delta P_l = (G/\xi)^2/\rho_l \approx 2.5$  кПа, а на двухфазном потоке при  $\phi = 0.8$   $\Delta P_{0.8} \approx 11.0$  кПа. Если использовать такой расходомер при погрузке/разгрузке танкера СПГ с общим объемом 150 000 м<sup>3</sup> из четырех сферических танков по 37 500 м<sup>3</sup>, при таком значении расхода время разгрузки каждого танка через трубу диаметром 457 мм составит  $37\,000/2090 \approx 18$  ч при технологическом остатке в танке 500 м<sup>3</sup> жидкости. При повышении расхода  $G_{\min}$  на 40% с увеличенным примерно в 2 раза перепадом давления на СУ  $\Delta P_l \approx 5$  кПа время разгрузки сократится примерно до 12.5 ч, что хорошо согласуется с данными работы [4].

Отметим, что в работе [8] в первом приближении было получено расчетное соотношение  $\Delta P/G^2 = \xi^{-2}/\rho_h = cx_h + d$  для определения величины массового расхода двухфазного потока СПГ в предположении его гомогенной структуры, а коэффициенты  $c$  и  $d$  определены на основе экспериментальных данных для моделирующих потоков эксол–сжатый воздух при абсолютном давлении 5 бар. Однако, как показали дальнейшие исследования [26, 27], такое моделирование двухфазных потоков СПГ некорректно вследствие существенно различающегося поведения маловязких двухфазных потоков, к которым относятся потоки СПГ, и двухфазных потоков с газом на основе такой довольно

вязкой жидкости, как эксол. Так, в работе [27] показано, что для гомогенизированных потоков вода–газ и эксол–газ при их прохождении через коническое СУ при давлении 5 бар повышенный перепад давления через СУ для потоков эксол–газ, сопровождающийся снижением расхода такого двухфазного потока, в значительной степени обусловлен трением, поскольку вязкость эксола примерно в 3.5 раза выше, чем вязкость воды, тогда как для низковязких потоков вода–газ характерно протекание через СУ с пониженным перепадом давления и соответствующим повышенным расходом, т.е. для них наблюдается кризис гидравлического сопротивления (КГС) в СУ, что учитывается в рекомендованном для расчетов соотношении (1), когда  $\Delta P / \Delta P_h = C_{hc} \leq 1$ . Для двухфазных потоков СПГ, вязкость которых при  $T_s = 145$  К примерно в 16.5 раз меньше, чем для воды, также может наблюдаться КГС, что учтено в соотношении (1).

Далее представлены основные характеристики предложенных двухфазных расходомеров для СПГ при  $T_s = 145$  К на основе имеющихся ВЧ-датчиков паросодержания и  $\gamma$ -плотномеров.

Средства диагностики двухфазных потоков водорода и СПГ, представленные в табл. 1 и 2, могут применяться в технологических системах энергетических комплексов по производству, хранению и транспортировке этих сжиженных продуктов с изменением их агрегатного состояния.

Наконец, относительно влияния на характеристики СУ фактора трения  $k_{fr}$ , который может быть сомножителем в соотношении (1), отметим следующее. Эта величина может быть найдена посредством выражения  $k_{fr} = [1 + \lambda(\text{Re})Y\xi^2]^{-1/2}$  [10, 28], где  $\lambda(\text{Re})$  – коэффициент трения в СУ,  $\text{Re}$  – число Рейнольдса;  $Y$  – экспериментальный калибровочный параметр СУ, который можно найти при калибровке СУ на насыщенной жидкости (подробности представлены в работе [10]).

Оценки показали, что для гелия с его минимальной вязкостью  $k_{fr-\text{He}} \approx 0.999$  при  $m_{\text{He}} \approx 175$  кг/(м<sup>2</sup>с) и приведенных в работе [1] параметрах СУ. Что касается факторов трения для водорода и СПГ, вязкость которых превышает значение для гелия соответственно в 3.6 и 20 раз, то оценки с учетом соотношений (4), (5) и (9), (10) показывают, что для них произведение величин  $\lambda Y \xi^2$  практически равно нулю, и, следовательно,  $k_{fr-\text{H}_2} \approx k_{fr-\text{LNG}} \approx 1$ .

## 6. ВЫВОДЫ

Для водорода и СПГ с их сравнительно высокими отношениями плотностей жидкой и паровой фаз проблема неопределенности измерения величины расхода, связанная с влиянием наиболее сложного поправочного коэффициента  $k(G, \phi, T_s)$ , который зависит от режима течения двухфазного потока, решается посредством использования сужающих устройств с коэффициентами сужения  $D_1 / D_2 \approx 2^{1/2}$  и  $2^{1/4}$  соответственно для водорода и СПГ при обеспечении однородных режимов течения в тракте СУ, тогда как для гелия это отношение равно примерно двум. При этом величины массовых скоростей и выбор геометрических параметров СУ в первом приближении оцениваются с помощью соотношений (4), (5) для водорода при равновесной температуре  $T_s = 23$  К и выражений (9), (10) для СПГ при  $T_s = 145$  К. Фактором трения в СУ для водорода и СПГ можно пренебречь из-за выгодного сочетания коэффициентов трения, геометрических параметров СУ и соответствующих калибровочных параметров СУ. Предложенные оценочные соотношения (4), (5) и (9), (10) целесообразно уточнить на калибровочном стенде или по месту установки двухфазного расходомера.

Другая проблема неопределенности измерения расхода водорода и СПГ, связанная с нахо-

**Таблица 2.** Оценочные характеристики двухфазных расходомеров СПГ при  $T_s = 145$  К на базе комбинации СУ и ВЧ-датчиков паросодержания или  $\gamma$ -плотномеров

Тип ВЧ-датчика или $\gamma$ -плотномера	Диаметр ВЧ-датчика или $\gamma$ -плотномера, мм	Диаметры СУ, $D_1/D_2$ , мм	$G_{\min}$ , кг/с	$\Delta P$ , кПа	$\Delta P_{0.8}$ , кПа
Круговой	38	38/32	1.5	2.3	10.0
Круговой	70	70/58	5	2.6	11.3
<sup>137</sup> Cs- $\gamma$ -плотномер	250	250/208	64	2.5	11.0
<sup>137</sup> Cs- $\gamma$ -плотномер	457	457/380	213	2.5	11.0

ждением средней плотности потока  $\rho(\varphi) = \rho_g\varphi + \rho_l(1 - \varphi)$ , решается выбором ВЧ-датчика с подходящей чувствительностью (кругового или кольцевого поперечного сечения), что зависит от конкретных технических условий использования двухфазного расходомера, и обеспечением условий применения гомогенного соотношения для определения величины  $\rho(\varphi)$ .

Общий массовый расход  $G$  горизонтальных двухфазных потоков водорода и СПГ и равновесные значения расходов паровой и жидкостной фаз можно определить по соотношению (1), а величины  $G_{\min}$  и  $G_{\max}$  уточняются по месту установки двухфазного расходомера. Дополнительный поправочный коэффициент  $C_{hc}$  в формуле (1) за счет возможного кризиса гидравлического сопротивления в СУ можно определить на стенде или по месту установки двухфазного расходомера с помощью измерительных средств двухфазного расходомера и однофазных расходомеров, работающих на недогретой до состояния насыщения жидкости.

Для расширения диапазона применения двухфазного расходомера один и тот же ВЧ-датчик паросодержания может устанавливаться как в широком (рис. 3), так и в узком сечении СУ (рис. 4 и 5), что позволяет удвоить величину расхода, например для случаев с водородом.

При создании двухфазных расходомеров СПГ относительно больших диаметров ( $DN \geq 250$ ) для определения средней плотности потока  $\rho(\varphi)$  представляется целесообразным применение  $\gamma$ -плотномеров на основе высокоэнергетических изотопов  $^{137}\text{Cs}$ .

Предварительные оценки относительной неопределенности нахождения расхода двухфазных потоков водорода и СПГ могут проводиться по данным рис. 6 и соотношению (6), которое показывает, что для водорода при  $T_s = 23$  К и для СПГ при  $T_s = 145$  К величины  $\delta G/G_h \approx 1.45 \pm 0.15\%$  практически не отличаются от результатов для гелия при  $T_s = 4.5$  К в диапазоне  $\varphi_h$  от нуля до примерно 0.6. При  $\varphi_h = 0.8$  величина  $\delta G/G_h$  для водорода превышает соответствующее значение для гелия примерно в 1.5 раза, а при  $\varphi_h = 0.95$  – в 2.7 раза в рамках сделанных допущений, что требует экспериментальной проверки.

Калибровка ВЧ-датчиков паросодержания, работающих в широком диапазоне равновесных температур  $T_s$ , требует учета температурных поправок в соответствии с соотношением (8), например для водорода.

Предложенные подходы позволяют создать ряд двухфазных расходомеров водорода и СПГ на базе имеющихся средств диагностики, характеристики которых представлены в итоговых табл. 1 и 2.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филиппов Ю.П., Коврижных А.М., Филиппов А.Ю. // ПТЭ. 2025. № 3. С. 96.
2. Tarlowski J., Sheffield J., Durr C., Coyle D., Patel H. LNG Import Terminals – Recent Developments ChE Plus Newsletter. 2004. V. 2. № 4.  
[http://www.cheresources.com/lng\\_terminals.pdf](http://www.cheresources.com/lng_terminals.pdf)
3. Воронов В.А., Карякина Е.Д., Ахмеров Э.В. // Вестник международной академии холода. 2019. № 3. С. 15.  
<https://doi.org/10.17586/160643132019183-15-22>
4. Лесконог А.А., Чуркин Г.Ю., Бекасов Ю.В. // Безопасность труда в промышленности. 2017. № 12. С. 41.  
<https://doi.org/10.24000/0409-2961-2017-12-41-46>
5. Filippov Yu.P. // Cryogenics. 1999. V. 39. P. 59.  
[https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(98\)00114-3](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(98)00114-3)
6. Filippov Y.P., Panferov K.S. // Proc. of the 11-th IIR International Conference on Cryogenics, Bratislava, Slovakia, 2010. P. 87.
7. Filippov Y.P., Filippov A.Yu., Kovrizhnykh A.M. // 11 AIP Conf. Proc. 2023. V. 2803. P. 030001.  
<https://doi.org/10.1063/5.0143554>.
8. Filippov Y.P., Kakorin I.D. // Flow Meas. Instrum. 2016. V. 52. P. 163.  
<https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2016.10.005>
9. Филиппов Ю.П., Филиппов А.Ю. // Тепловые процессы в технике. 2021. Т. 13. № 3. С. 98.  
<https://doi.org/10.34759/tpt-2021-13-3-98-110>
10. Филиппов А.Ю., Филиппов Ю.П. // Теплоэнергетика. 2022. № 5. С. 18.  
<https://doi.org/10.1134/S0040363622050010>
11. Ко Гым Сек, Мамедов И.С., Филиппов Ю.П. Влияние массовой скорости на истинное объемное паросодержание потока двухфазного гелия. Сообщение ОИЯИ, Дубна, P8-87-505. 1987.
12. Сон Зун Ган, Филиппов Ю.П. // Теплоэнергетика. 1984. № 3. С. 19.
13. Paleev I.I., Filippovich B.S. // Int. J. Heat Mass Transfer. 1966. V. 9. P. 1089  
[https://doi.org/10.1016/0017-9310\(66\)90031-7](https://doi.org/10.1016/0017-9310(66)90031-7)
14. Нигматулин Б.И., Милашенко В.И., Шугаев Ю.3. // Теплоэнергетика. 1976. № 5. С. 77.
15. Filippov Yu.P., Kovrizhnykh A.M., Miklayev V.M., Sukhanova A.K. // Cryogenics. 2000. V. 40. P. 279.  
[https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(00\)00040-0](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(00)00040-0)
16. Miklayev V.M., Filippov Yu.P., Filippov A.Yu. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2020. V. 17. P. 44  
<https://doi.org/10.1134/S1547477120010124>

17. Филиппов А.Ю., Филиппов Ю.П., Коврижных А.М. // ПТЭ. 2023. № 4. С. 132.  
<https://doi.org/10.31857/S0032816223030047>
18. Filippov Yu.P. // Cryogenics. 2001. V. 41. P. 327.  
[https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(01\)00080-7](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(01)00080-7)
19. Filippov Y.P., Panferov K.S. // Cryogenics. 2011. V. 51. P. 640.  
<https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2011.09.01>
20. Филиппов Ю.П., Алексеев А.И. РФ Патент 2046331, 1995.
21. Certificate to calibrate hydrogen RF-sensor ID = 71 mm, #700–26/170 of 06.03.1998, JINR, Dubna.
22. Certificate to calibrate helium RF-sensor ID = 20 mm of 07.10.2005, JINR, Dubna.
23. Sveshnikov B.N., Smirnov S.N., Filippov A.Yu., Filippov Yu.P. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2021. V. 18. P. 52.  
<https://doi.org/10.1134/S1547477121010118>
24. Demaco to Build Transport Pipelines for LNG Receiving Terminals, Norway.  
<http://www.lngworldnews.com/demaco-to-build-transport-pipelines-for-lng-receiving-terminals-norway>.
25. Блок гамма-источника типа БГИ-50П. Технические условия УЛКА 418234.003; Руководство по эксплуатации УЛКА 418234.003. Техническая документация.
26. Filippov Yu.P., Filippov A.Yu. // Flow Meas. Instrum. 2019. V. 68. P. 101578.  
<https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2019.101578>
27. Филиппов А.Ю., Филиппов Ю.П. // Тепловые процессы в технике. 2022. Т. 14. С. 225.  
<https://doi.org/10.34759/tpt-2022-14-5-225-240>
28. Filippov Yu.P., Panferov K.S. // Int. J. Multiphase Flow. 2012. V. 41. P. 36.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2011.12.005>

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ  
В ЛАБОРАТОРИЯХ

УДК 621.317.72+621.317.321

МОБИЛЬНЫЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС  
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

© 2024 г. А. В. Ключев<sup>а</sup>, А. В. Якимов<sup>а</sup>, А. В. Беляков<sup>б</sup>

Поступила в редакцию 08.11.2024 г.

После доработки 22.12.2024 г.

Принята к публикации 13.02.2025 г.

DOI: 10.31857/S0032816225030178

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы активно развивается низкочастотный (НЧ) шумовой анализ для неразрушающей диагностики качества структуры полупроводниковых приборов. Однако зачастую на процесс измерений влияют внешние электромагнитные помехи [1]. Разработанный мобильный многофункциональный комплекс предназначен для проведения измерений в экранированных помещениях, а также в полевых условиях.

Мобильный комплекс состоит из экранированного от внешних электромагнитных помех блока (в который помещается исследуемый образец), предварительного усилителя напряжения, аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и персонального компьютера (ноутбука). Принципиальная схема комплекса представлена на рис. 1.

Исследуется шумовое напряжение  $U_d$  на диоде  $D$  при протекании тока  $I_d$ . Вариация тока  $I_d$  осуществляется с помощью блока добавочных сопротивлений  $R_b$ . Для эффективного использования АЦП шумовое напряжение  $U_d$  усиливается предварительным малозумящим усилителем напряжения Low Noise Preampfier 5113 (и в случае необходимости Ultra Low Noise Preampfier 5184), питающимся от собственных аккумуляторных батарей, интегрированных в его корпус.

Усиленное шумовое напряжение оцифровывается с помощью двух модулей: NI-9239 и NI cDAQ-9172. Непосредственно АЦП располагается в плате аналогового ввода данных NI-9239, которая, в свою очередь, размещается в многофункциональном шасси NI cDAQ-9172, обеспечивающем передачу данных на вход ноутбука. Плата NI cDAQ-9172 обладает интерфейсом USB 2.0. Плата NI-9239 имеет 4 канала, максимальная частота дискретизации составляет



Рис. 1. Принципиальная схема мобильного комплекса.

<sup>а</sup> Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Россия, Нижний Новгород.

<sup>б</sup> ООО «Гарда Технологии», Россия, Нижний Новгород.

50 кГц, разрядность АЦП составляет 24 бита, частотный диапазон 0.2 Гц – 50 кГц, диапазон измеряемых напряжений  $\pm 10$  В.

Вместо указанных модулей производства National Instruments источником оцифрованного шума может являться модуль аналогового ввода-вывода отечественного производителя ADS224  $\times$  48 (“Инструментальные системы”, Москва). Плата аналогового ввода-вывода ADS224  $\times$  48 имеет следующие характеристики: входное сопротивление 600/150 Ом, емкость  $40 \pm 8$  пФ; два дифференциальных канала ввода/вывода; 24битный АЦП, программируемый коэффициент передачи (1, 2, 4, 8, 16, 32, 64); переключаемая частота взятия отсчетов 6–48 кГц.

Для записи и последующей обработки оцифрованных данных применяется разработанный на языке программирования LabVIEW 8.5 программный комплекс, состоящий из блока записи и блока анализа.

## 2. БЛОК ЗАПИСИ

Блок записи обеспечивает взаимодействие используемых модулей NI-9239 и NI cDAQ-9172 с жестким диском компьютера и управляет процессом записи шумового сигнала. С помощью данного блока осуществляются выбор тактовой

частоты АЦП платы NI-9239 и длительности записываемого шумового сигнала, контроль за первичными статистическими характеристиками сигнала, такими как среднее, дисперсия, мгновенный спектр, и присвоение текстовой легенды анализируемому сигналу. С помощью блока записи также задаются количество используемых каналов платы NI-9239 и их конфигурации (дифференциальный, с общим заземленным проводом, с общим незаземленным проводом); осуществляются выбор способа считывания данных платой (непрерывно, “пачками”) и выбор формата данных для сохранения оцифрованного сигнала.

## 3. БЛОК АНАЛИЗА

Блок анализа представляет собой программный комплекс ADSViewer, разработанный ранее [2] для обработки данных, записанных с помощью платы ADS224  $\times$  48. Этот блок позволяет анализировать следующие статистические характеристики шума: осциллограмму, гистограмму, спектральную плотность мощности, биспектр, функцию бикогерентности и параметры их формы.

На рис. 2 показаны гистограмма исследуемого шума и эта же гистограмма в гауссовых координатах. Если исследуемый шум  $x(t)$  имеет одномерную функцию распределения гауссова

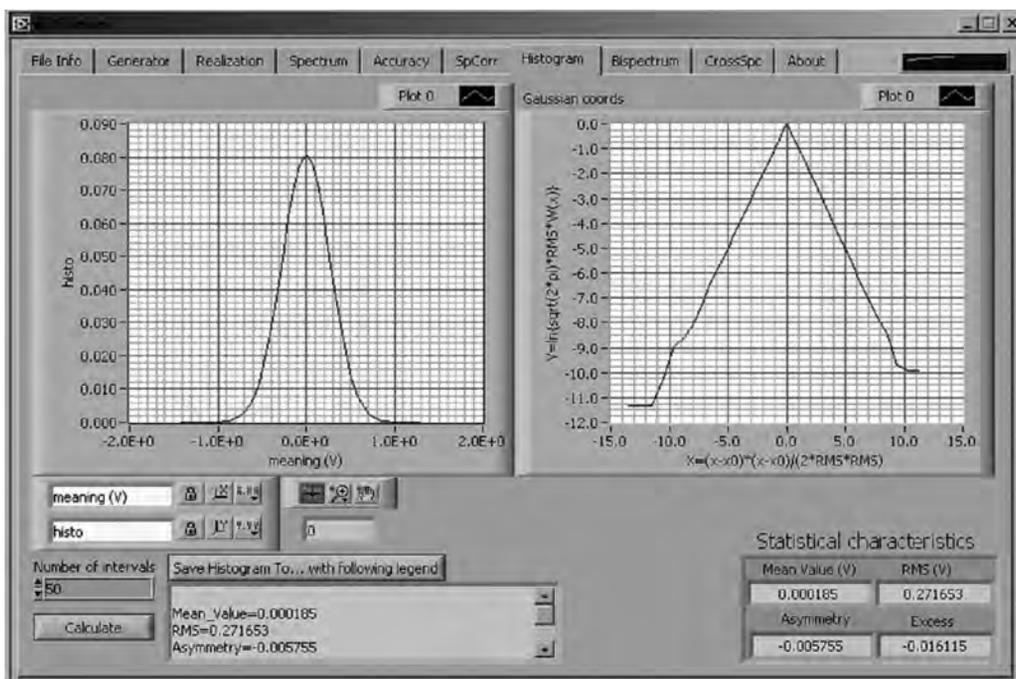


Рис. 2. Панель анализатора ADSViewer, предназначенная для изучения гистограммы и первых четырех кумулянтов шума.

вида  $W$  (со средним значением  $\langle x \rangle$  и дисперсией  $\sigma_x^2$ ), то в так называемых гауссовых координатах

$$X_g = (x - \langle x \rangle) \cdot |x - \langle x \rangle| / (2\sigma_x^2), Y_g = \ln \left( W \sqrt{2\pi\sigma_x^2} \right)$$

эта функция имеет вид двух биссектрис в третьем и четвертом квадрантах. Одновременно с построением гистограммы рассчитываются такие статистические характеристики, как среднее, стандартное отклонение от среднего, коэффициенты асимметрии и эксцесса.

#### 4. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОБИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Масса мобильного комплекса с учетом ноутбука и аккумуляторных батарей не превышает 20 кг. Конструктивно мобильный комплекс без ноутбука размещается в кейсе с размерами  $400 \times 300 \times 150$  мм<sup>3</sup>. Питание элементов мобильного комплекса осуществляется от аккумуляторных батарей напряжением 12 В. Период автономной работы мобильного комплекса ограничивается временем функционирования ноутбука в режиме питания от батареи. Частотный диапазон работы от 1 Гц до 25 кГц. Собственный шум мобильного комплекса на частоте 1 кГц не превышает 850 пВ/Гц<sup>1/2</sup> [3].

Работа мобильного комплекса апробирована для измерений статистических характеристик НЧ-шумов полупроводниковых диодов с  $p$ - $n$ -переходом [4], диодов с барьером Шоттки [5], диодов Шоттки с  $\delta$ -легированием [6], используемых для детектирования сигналов [7–10].

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Е.И. Шмелёву за участие в разработке мобильного многофункционального комплекса и участие в проведении экспериментов.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы “Приоритет 2030”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ключев А.В., Якимов А.В. // Вестник Нижегородского университета. 2007. № 6. С. 5. <http://www.vestnik.unn.ru/ru/nomera?anum=1811>
2. Шмелев Е.И., Ключев А.В., Якимов А.В. // Вестник Нижегородского университета. 2009. № 5. С. 81. <http://www.vestnik.unn.ru/ru/nomera?anum=2719>
3. Ключев А.В., Якимов А.В. // Труды XXVIII научной конференции по радиофизике. НН: ННГУ, 2024. С. 251. <https://rf.unn.ru/wp-content/uploads/sites/21/2024/10/rf-conf-2024-radiophysical-measurements.pdf>
4. Ключев А.В., Шмелев Е.И., Якимов А.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57. № 12. С. 995. [https://radiophysics.unn.ru/sites/default/files/papers/2014\\_12\\_995.pdf](https://radiophysics.unn.ru/sites/default/files/papers/2014_12_995.pdf)
5. Klyuev A.V., Yakimov A.V., Zhukova I.S. // Fluct. Noise Lett. 2015. V. 14. № 3. P. 1550029. <https://doi.org/10.1142/S0219477515500297>
6. Klyuev A.V., Shmelev E.I., Yakimov A.V. // Fluct. Noise Lett. 2014. V. 13. № 1. P. 1450003. <https://doi.org/10.1142/S0219477514500035>
7. Ключев А.В. // Вестник МГУ. Серия 3. Физика. Астрономия. 2011. № 3. С. 20. <http://vnu.phys.msu.ru/abstract/2011/3/11-3-020/>
8. Ключев А.В. // Вестник МГУ. Серия 3. Физика. Астрономия. 2012. № 3. С. 13. <http://vnu.phys.msu.ru/abstract/2012/3/12-3-13/>
9. Ключев А.В. // Радиотехника и электроника. 2013. Т. 58. № 2. С. 199. <https://doi.org/10.7868/s0033849413010063>
10. Klyuev A.V. // Int. J. Mod. Phys. B. 2013. V. 27. № 13. P. 1350049. <https://doi.org/10.1142/S0217979213500495>

Адрес для справок: Россия, 603022, Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского. E-mail: [klyuev@rf.unn.ru](mailto:klyuev@rf.unn.ru)

## ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ В ЛАБОРАТОРИЯХ

УДК 53.07

# СИСТЕМА СБОРА НАУЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В КОСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

© 2025 г. Д. В. Лисин

Поступила в редакцию 20.01.2025 г.

После доработки 25.02.2025 г.

Принята к публикации 17.03.2025 г.

DOI: 10.31857/S0032816225030188

Проведение комплексных экспериментальных исследований на орбите Земли требует наличия, с одной стороны, типовых и достаточно отработанных, а с другой – достаточно гибких систем информационного обеспечения, способных подстраиваться под постоянно изменяющиеся потребности сложных комплексов научной аппаратуры [1]. В ходе проведения работ по организации информационного обеспечения экспериментальных исследований Солнца на орбитальной обсерватории “КОРОНА С-Ф” в ИЗМИ РАН создана компактная система сбора научной информации и управления комплексом научной аппаратуры. Основная особенность системы – возможность гибкой адаптации под изменяющиеся требования к характеристикам информационного обмена и алгоритмам управления, в том числе и непосредственно в процессе полета, что делает данную разработку актуальной в современных непростых реалиях [2].

Система сбора научной информации конструктивно состоит из двух идентичных блоков (основной и резервный), которые работают в составе комплекса совместно с блоком управления и соединений [3]. Система имеет возможность подключения двух идентичных приемопередатчиков командной радиолинии управления [4] и двух телеметрических передатчиков для организации каналов управления, телеметрии и передачи научной информации.

Блоки системы имеют следующие основные технические характеристики:

- габаритные размеры  $360 \times 315 \times 160$  мм<sup>3</sup>;
- масса 10.5 кг;
- тип соединительных разъемов – РС;
- количество обслуживаемых приборов экспериментального комплекса по цифровому протоколу – 10, по аналоговому – 2;

- тип цифрового канала обмена с приборами экспериментального комплекса: цифровой, синхронный, двунаправленный, с вариативной производительностью;

- наличие системы привязки производимых измерений к реальному времени с точностью до 1 мс;

- объем буферной памяти 128 Мбайт и более в зависимости от задач;

- скорость обмена по командной радиолинии 64 кбит/с;

- скорость обмена по телеметрической радиолинии 1 Мбит/с и более в зависимости от задач;

- протокол обмена по командной радиолинии собственной разработки: закрытый, квитируемый, помехозащищенный, с применением корректирующего кода с повторением и инверсией;

- программное обеспечение: без операционной системы, полностью собственной разработки, жесткого реального времени с использованием аппаратных средств;

- элементная база модуля постоянного запоминающего устройства, хранящего основную программу управления – микросхемы 556РТ7 на базе однократно прожигаемых перемычек.

Элементная база системы сбора научной информации рассчитана на длительную (7–10 лет) эксплуатацию в условиях космического пространства под радиационными поясами Земли, она максимально использует радиоэлектронные компоненты российского производства. Логические схемы выполнены в основном на программируемых логических матрицах, что позволяет производить адаптацию к меняющимся требованиям конкретных экспериментальных комплексов в значительных пределах без переделки аппаратной части системы. Важной особенностью является также

возможность полного перепрограммирования всех вычислителей комплекса в процессе полета по защищенной командной радиолнии, включая основной вычислитель самой системы сбора научной информации, например в случае возникновения необходимости оперативного изменения логики проведения экспериментов [1]. При этом надежность функционирования системы сбора научной информации не снижается, так как перепрограммирование ведется в оперативной памяти с сохранением возможности штатной загрузки системы с изначального постоянного запоминающего устройства на прожигаемых перемычках, содержащего заведомо работоспособную и отлаженную программу управления.

Таким образом, благодаря заложенным техническим решениям, обеспечивающим значительную гибкость и возможность динамической

адаптации к оперативной обстановке в процессе проведения экспериментов, разработанная в ИЗМИ РАН система сбора научной информации имеет значительный потенциал применения в будущих российских программах экспериментальных исследований в условиях космического пространства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Игнатъев А.П., Слемзин В.А., Кузин С.В. и др.* // ПТЭ. 2008. № 5. С. 71.
2. *Лисин Д.В.* Система информационного обеспечения солнечной обсерватории КОРОНА С-Ф. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co.KG, ISBN: 978-3-8433-2598-1, 2011.
3. *Лисин Д.В.* // ПТЭ. 2022. № 3. С. 159. <https://doi.org/10.31857/S0032816222030168>
4. *Лисин Д.В.* // ПТЭ. 2021. № 5. С. 159. <https://doi.org/10.31857/S0032816221040236>

*Адрес для справок: Россия, 108840, Москва, Троицк, Калужское ш., 4, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова, Центр космических информационных технологий. E-mail: lisindv@izmiran.ru*

## АННОТАЦИИ СТАТЕЙ, НАМЕЧАЕМЫХ К ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ ПТЭ

DOI: 10.31857/S0032816225030192

### ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

**Мещеряков А.И., Гришина И.А. Моделирование распространения и поглощения быстрых магнитозвуковых волн, возбуждаемых в плазме стелларатора L-2M.** – 12 с., 7 рис.

Разработан код для расчета распространения и поглощения быстрых магнитозвуковых (БМЗ) волн, возбуждаемых в плазме установок УТС. Рассчитаны продольные и азимутальные волновые числа БМЗ-волны, распространяющейся в дейтериевой плазме с параметрами, характерными для режима омического нагрева в стеллараторе L-2M. Частота волны соответствует второй гармонике ионной циклотронной частоты дейтерия. Использовалась модель холодной бесстолкновительной плазмы в цилиндрической геометрии. Рассчитано поглощение БМЗ-волны ионами и электронами. Показано, что для второй гармонике ионной циклотронной частоты дейтерия 79% мощности БМЗ-волны будет поглощаться ионами. Поэтому для эффективной генерации токов увлечения БМЗ-волной в дейтериевой плазме нужно либо использовать более высокие гармоники ионной циклотронной частоты, либо искать альтернативные механизмы поглощения БМЗ-волны электронами, например метод конверсии мод.

**Павлюк А.О., Котляревский С.Г., Беспала Е.В., Кан Р.И., Зеленецкая Е.П. Методические подходы к определению параметров выделения энергии Вигнера в облученном графите.** – 15 с., 9 рис.

Представлены методические подходы к определению параметров отжига радиационных дефектов и, соответственно, выделения запасённой энергии (энергии Вигнера). Рассмотрены подходы к отбору проб графита из разных мест и элементов графитовых кладок промышленных уран-графитовых реакторов, а также устройство экспериментальной установки для дифференциально-термического анализа проб, позволившей получить спектры выделения энергии Вигнера

графита и опробовать алгоритм их математической обработки для определения энергий активации.

**Сибиряк Ю.Г., Базылев С.Н., Щипунов А.В., Филиппов И.А. Модернизация карты измерительной электроники фотонного спектрометра эксперимента ALICE/CERN.** – 19 с., 9 рис.

Описана конструкция модернизированной карты измерительной электроники (КИЭ) фотонного спектрометра эксперимента ALICE/CERN. Разработка новой КИЭ связана с повышением светимости и энергии пучков большого адронного коллайдера и с необходимостью повысить точность измерения времени пролета для лучшей идентификации регистрируемых частиц. Существующая КИЭ фотонного спектрометра не отвечает новым требованиям и должна быть заменена по плану модернизации. Улучшение измерительных характеристик КИЭ достигается за счет аппаратного измерения времени пролета вместо офлайн-обработки кодов оцифровки формы сигнала фотодетектора. Модернизированная КИЭ содержит 32 измерительных канала и все функциональные блоки, необходимые для работы фотонного спектрометра. Приведено описание функциональных блоков. Представлены результаты измерений характеристик модернизированной КИЭ на тестовых пучках PS и SPS в CERN в диапазоне импульсов от 1 до 150 ГэВ/с. По полученным результатам сделан вывод, что разработанная карта полностью соответствует требованиям к КИЭ модернизированного фотонного спектрометра.

### ЭЛЕКТРОНИКА И РАДИОТЕХНИКА

**Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Лаврухин М.А. Высоковольтный генератор импульсов с удвоением напряжения и частотой до 300 кГц.** – 10 с., 6 рис.

Показана возможность использования составного газоразрядного прибора на основе комбинации капиллярного разряда и плазмен-

ного катода (эптрона) в генераторе импульсов амплитудой до 46 кВ при частоте повторения импульсов до 300 кГц. В схеме использованы два эптрона: в составе удвоителя напряжения и в качестве выходного наносекундного коммутатора. Достигнута эффективность перезарядки удвоителя 85%.

**Калаев М.П., Телегин А.М. Моделирование и оптимизация характеристик высоковольтного источника питания электростатического ускорителя пылевых частиц.** — 10 с., 9 рис.

Рассмотрены принципы построения высоковольтного источника с выходным напряжением 50–100 кВ питания линейного электростатического ускорителя пылевых частиц, который используется для моделирования воздействия микрометеороидов и частиц космического мусора на элементы конструкции космических аппаратов. На основе компьютерного моделирования выбраны основные электронные компоненты, входящие в схему высоковольтного генератора, проведено испытание в составе ускорителя. Рассчитано влияние пульсаций выходного напряжения на ускорение пылевой частицы с размерами 1–10 мкм в тракте, состоящем из 11 полых цилиндрических электродов с суммарным ускоряющим напряжением 100 кВ.

**Кулиш М.И. Генератор импульсов на лавинном транзисторе с низким напряжением питания схемы.** — 7 с., 7 рис.

Представлено описание генератора наносекундных импульсов. Импульсы формируются при лавинном пробое транзистора, который также участвует в формировании напряжения, необходимого для лавинного пробоя коллекторного перехода. В результате схема компактна и работоспособна уже при питающем напряжении 1.1 В. Схема весьма проста, не требует наладки, применяемые детали доступны. Амплитуда формируемых импульсов составляет примерно 40 В при нагрузке 50 Ом.

**Ошлаков В.Г., Щербаков А.П. Автоматический измеритель импульсных или непрерывных световых потоков.** — 10 с., 5 рис.

Рассматривается автоматический измеритель импульсных или непрерывных световых потоков, управляемый центральным процессором. Коэффициент усиления регулируется двумя цифровыми потенциометрами, предложен метод

регулирования. При повышении светового потока до  $\Phi_{\text{макс}} = 2.2 \cdot 10^{-5}$  Вт возможно формирование команды *Уменьшить световой поток*. Синхронный детектор увеличивает чувствительность измерителя. Чувствительность, характеризуемая импульсной мощностью на длине волны 520 нм, не хуже  $0.1 \cdot 10^{-6}$  Вт. Частота модуляции светового потока 1000 Гц. Приведены формулы, позволяющие перейти на другую частоту модуляции.

## ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

**Кропотов Г.И., Цыпишка Д.И., Авицюк В.Е. Применение балансного электрооптического детектора в терагерцевом импульсном спектрометре.** — 11 с., 8 рис.

Разработан электрооптический детектор терагерцевого излучения. Обсуждаются базовые принципы работы прибора и его особенности. Приводятся основные характеристики электрооптического детектора и отмечаются преимущества его применения в спектроскопических системах терагерцевого диапазона.

**Сафончик М.О., Шахов М.А. Лабораторная установка импульсного магнитного поля до 35 Тл для магнитотранспортных измерений.** — 20 с., 10 рис.

Созданная в ФТИ им. А.Ф. Иоффе установка импульсного магнитного поля позволяет измерять транспортные явления (эффект Холла, магнитосопротивление) материалов в импульсном магнитном поле с многократно получаемыми импульсами амплитудой до 35 Тл и длительностью импульса 10 мс. Приведено обоснование оптимального выбора структуры установки, схемотехники и алгоритмов обработки. Удобство в эксплуатации и небольшие затраты делают установку хорошим выбором для научной лаборатории.

**Хурчиев А.О., Скобляков А.В., Волков В.А., Лапшин М.А., Высоцкий С.А., Канцырев А.В., Голубев А.А. Калибровка детекторных пленок Imaging Plates для регистрации рентгеновского излучения.** — 9 с., 2 рис.

Детекторные пленки Imaging Plates (IP) широко используются в лазерно-плазменных и радиографических экспериментах для детектирования электронов, ионов и рентгеновского излучения. Применение IP в диагностике

плазмы позволяет получить количественную информацию о параметрах плазмы. В настоящей работе представлены результаты калибровки детекторных пленок FujiFilm Imaging Plates BAS-MS и BAS-TR для рентгеновского излучения в диапазоне до 10 МэВ. Калибровка проводилась с помощью радиоактивного позитронного источника Ge-68 и лазерного медицинского сканера Durr Dental VistaScan Mini View.

## **ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

**Борзаков С.Б., Голубков Е.А., Ергашов А.М., Зонтиков А.О., Копач Ю.Н., Мажен С., Кузнецов В.Л., Мицына Л.В., Реброва Н.В., Рогов А.Д., Седышев П.В., Симбирцева Н.В., Храмо К.** **Источник резонансных нейтронов (ИРЕН): определение потоков резонансных и тепловых нейтронов, энергетической функции разрешения и зависимости потока от энергии нейтронов.** — 14 с., 12 рис.

Потоки тепловых и резонансных нейтронов, зависимость потока нейтронов от их энергии и функция разрешения определены экспериментально для одиннадцатиметровой и шестидесятиметровой пролетных баз (на четвертом и третьем каналах) установки “Источник резонансных нейтронов” (ИРЕН), ОИЯИ. Полученные экспериментально характеристики установки ИРЕН подтверждены расчетами методом Монте-Карло.

**Быков Т.А., Колесников Я.А., Кошкарев А.М., Остринов Г.М., Савинов С.С., Щудло И.М., Таскаев С.Ю.** **Исследование пучка ионов в ускорителях-тандемах с вакуумной изоляцией.** — 10 с., 7 рис.

Для бор-нейтронозахватной терапии — перспективной методики лечения злокачественных опухолей — требуются ускорительные источники нейтронов эпитеплового диапазона энергий. Одним из востребованных ускорителей заряженных частиц является тандемный электростатический ускоритель оригинальной конструкции, названный со временем ускорителем-тандемом с вакуумной изоляцией ВИТА. В работе представлены результаты измерения фазового портрета пучка ионов, получаемого на экспериментальной установке в Институте ядерной физики СО РАН и на установках для онкологических клиник, отличающихся наличием предускорения.

Показаны преимущества и недостатки использования предускорения. Сделаны предложения для улучшения ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией, требующие экспериментальной проверки.

**Дектерев Д.А., Мешкова В.Д., Шульженко П.Д., Дектерев А.А., Необъявляющий П.А.** **Методика визуализации приземных вихревых структур в задачах архитектурно-градостроительной аэродинамики.** — 11 с., 5 рис.

Изучение аэрационного режима в условиях городской застройки является важной и актуальной задачей. Основными исследовательскими подходами в ее решении являются численное моделирование и эксперименты в аэродинамических трубах. Экспериментальные данные важны как для качественной оценки структуры потока, так и для верификации математических моделей. В настоящей работе представлены результаты исследований приземных вихревых структур методом сажемасляной визуализации для моделей различных типов городской застройки, проводимых на аэродинамических установках. Описана методика проведения эксперимента как на канонических моделях в форме куба, так и для более сложных макетов застройки. Сопоставление результатов сажемасляной визуализации с расчетными векторными полями напряжения на поверхности показало их качественное соответствие.

**Стерлядкин В.В., Куликовский К.В., Кузьмин А.В.** **Установка для исследования влияния капиллярных волн на микроволновое излучение взволнованной поверхности.** — 13 с., 8 рис.

Описана оригинальная установка для исследования вклада капиллярных волн в диапазоне волновых чисел  $k = 100-1200$  рад/м в микроволновое излучение водной поверхности. Особенностью технического решения является генерация почти монохроматической решетки капиллярных волн на поверхности плоского сосуда, что позволяет в “чистом” виде изучать критические явления, возникающие в микроволновом излучении поверхности при определенных углах наблюдения. Генерация капиллярных волн заданной частоты и амплитуды проводилась тонкой планкой на поверхности, а ее колебания задавались устройством, расположенным под поверхностью воды. Форма полученной волны регистрировалась с точностью до

0.03 мм оригинальным методом по изображению светящейся линии, отраженной от поверхности. Вертикальный угол наблюдения варьировался от  $8^\circ$  до  $70^\circ$ , а азимутальные углы поворота капиллярной решетки изменялись на  $360^\circ$ . Микроволновый радиометр позволял измерять вариации яркостной температуры на четырех поляризациях с чувствительностью 0.1 К при времени накопления 1 с. Обнаружено, что капиллярные волны амплитудой всего 0.15–0.20 мм вызывают резонансное увеличение интенсивности излучения, достигающее 5–6.5 К. С теорией согласуются как амплитуда, так и положение резонансного пика, которое смещалось к меньшим углам места при стремлении длины капиллярной волны к длине волны излучения.

**Суторихин И.А., Соловьев В.А., Кривобоков Д.Е. Приборный комплекс для измерения спектральной подводной освещенности пресноводных водоемов по глубине с минимизацией внешних влияющих факторов.** – 10 с., 10 рис.

Приведено описание приборного комплекса для измерения спектральной подводной освещенности на разных глубинах пресноводных водоемов, который состоит из двух герметичных погружаемых измерительных боксов и одного внешнего блока обработки данных. Основное отличие комплекса от аналогичных устройств в минимизации влияния изменения внешней надводной освещенности, связанной с облачностью, туманом, дымкой и слабым поверхностным волнением, на измерения. Комплекс опробован на различных глубинах нескольких участков акватории Телецкого озера в ходе экспедиции в летний период 2024 года. Приведены результаты измерений и выполнена оценка влияния слабого волнения водной поверхности.

**Филиппов М.В. Имитатор черного тела для калибровок научной аппаратуры “Солнце-Терагерц”.** – 14 с., 3 рис.

Космический эксперимент “Солнце-Терагерц” готовится к проведению на борту российского сегмента Международной космической станции с 2026 г. Цели эксперимента – получение данных о терагерцевом излучении Солнца, а также об изучении солнечных активных областей и солнечных вспышек. Научная аппаратура “Солнце-Терагерц” состоит из восьми детекторов, целевые частоты которых лежат в диапазоне 0.4–12.0 ТГц. Для первичных калибровок детек-

торов научной аппаратуры необходим тепловой источник. Для этого был разработан имитатор черного тела, позволяющий направлять в телескопы научной аппаратуры потоки от излучающего элемента при различных температурах. По результатам экспериментальной проверки сделаны выводы о точности задания температур измерителем-регулятором и о температурном градиенте от центра к краю зеркала излучателя.

## ЛАБОРАТОРНАЯ ТЕХНИКА

**Jizhou Han, Yan Liu, Peishuo Jiang, Fei Kou, Xiang Cheng, Weidong Wang. Design and analysis of a piezo-driven calibration device for force sensor.** – 17 p., 11 fig. (публикуется только в английской версии ПТЭ).

This paper presents the development of a piezo-driven calibration device for force sensors. A piezoelectric actuator is used to generate the original driving force and a two-stage hybrid displacement amplifier can adjust the driving displacement and loaded force into the desirable range for sensor calibration. A force tester is set on the output end of the amplifier to load and monitor the calibration force. The features of the displacement amplifier and force tester are theoretically modeled and verified by finite element analysis (FEA). A laboratorial prototype is realized by assembling the commercial piezoelectric actuator into the displacement amplifier fabricated using wire electrical discharge machining, and adhering metallic strain gauge onto the sensing beam of the force tester. The experimental results demonstrate that the device can output a displacement of  $666 \mu\text{m}$  under the 130 V driving voltage and successfully realize the 0.2 N-range sensor calibration with the error of 0.56%.

**Краснов А.А., Семенов А.М. Результаты измерений характеристик вакуумного насоса из дисков спеченного нераспыляемого геттера для водорода и его изотопов для применения в плазменных установках.** – 10 с., 4 рис.

Представлены измеренные удельные вакуумные характеристики нераспыляемого геттера Ti–Zr–Al для водорода и его изотопов для применения в установках термоядерного синтеза. В вакуумной системе инжекторов нейтральных пучков требуются скорости откачки водорода и дейтерия в миллионы литров в секунду при давлении  $10^{-5}$  торр. Были получены удельные скоро-

сти откачки порядка  $0.81 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$  для водорода и  $0.44 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$  для дейтерия для геттера Ti–Zr–Al, а также измерена сорбционная емкость по водороду, которая равняется более  $6 \text{ л} \cdot \text{торр}/\text{г}$ .

**Мещеряков А.И., Гришина И.А., Попов М.Е. Система ионного циклотронного нагрева плазмы в стеллараторе Л-2М и ее использование для предварительной ионизации рабочего газа.** — 13 с., 5 рис.

Создана двухканальная система ионного циклотронного резонансного нагрева на стеллараторе Л-2М, позволяющая вводить в плазму ВЧ-излучение мощностью 2 кВт. С помощью созданной системы была проведена предварительная ионизация плазмы, предшествующая созданию плазмы омического нагрева в стеллараторе Л-2М. В экспериментах по предварительной ионизации было продемонстрировано уменьшение примерно на 15% напряжения на обходе непосредственно перед пробоем рабочего газа. Было также продемонстрировано эффективное подавление генерации убегающих электронов при помощи ВЧ-излучения на начальной стадии формирования разряда. Об этом свидетельствует уменьшение в 10 раз интенсивности жесткого рентгеновского излучения.

**Онищук Д.А., Литвин А.П., Парфенов П.С. Калибровка сканирующего зондового микроскопа Кельвина и определение уровней Ферми нанокристаллов сульфида свинца.** — 16 с., 6 рис.

Калибровку величины работы выхода зондов для сканирующей микроскопии Кельвина, традиционно основанную на использовании высокоориентированного пиролитического графита, предлагается дополнять калибровкой по распространенному материалу — оксиду олова, легированному индием и фтором (ИТО и ФТО). Исследование проводится с использованием зондов с платиновым и золотым покрытиями. По результатам калибровки определяются положения уровня Ферми нанокристаллов сульфида свинца с лигандными оболочками 1,2-этандитиола и тетрабутиламмония йодида. Показано, что выбранные оксиды характеризуются стабильной величиной работы выхода, дополнительная калибровка по оксидам помогает надежнее установить абсолютное положение работы выхода зондов, а золотые зонды обеспечивают более стабильный результат. Выбранные оксиды можно

использовать и как дополнение к калибровке по пиролитическому графиту, и самостоятельно.

**Прохоров Д.А., Зуев С.М. Физические измерения ортотропии тонких пленок оксида графена.** — 10 с., 4 рис.

Представлены измерения коэффициентов тепло- и температуропроводности тонких пленок оксида графена (GO) в трех взаимно перпендикулярных направлениях в диапазонах температур от 203 до 373 К. Подробно описаны процесс и особенности измерения тонких пленок GO при температурах вблизи температур восстановления GO (около 393 К). При применении метода лазерной вспышки (LFA), метода дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и гидростатического взвешивания были получены экспериментальные зависимости удельной теплоемкости, плотности, коэффициентов тепло- и температуропроводности от температуры тонких пленок GO. В результате работы были измерены удельная теплоемкость, а также тепло- и температуропроводность тонких пленок GO в зависимости от температуры, кроме того, было установлено, что применение метода лазерной вспышки при измерении температуропроводности в диапазоне температур от 273 до 373 К позволяет рассматривать анизотропные материалы как ортотропные.

**Яскин А.С., Зарвин А.Е., Каляда В.В., Дубровин К.А., Художитков В.Э., Деринг Е.Д., Ващенко П.В., Лабусов В.А. Визуализация сверхзвуковых разреженных газовых потоков сложной формы.** — 11 с., 4 рис.

Специализированный сканер MACI-USB использован для оптических измерений, анализа формы и структуры сверхзвуковых недорасширенных газовых струй сложной формы в разреженном пространстве с давлением 0.2–20 Па. Свечение газа инициировалось сфокусированным пучком электронов с энергией около 10 кэВ. Сечения газовой струи получены равномерным перемещением струи относительно электронного луча. Продемонстрированы возможности использования сканирующей системы, разработанной на основе современных аппаратных и программных средств, для визуализации течений в сверхзвуковых струях со сложной конфигурацией потоков. Сочетание сканирования и фотовизуализации обеспечивает возможность более полного описания структуры сверхзвуковых потоков, в том числе в условиях кластированных течений.