

ЦИРКУЛЯЦИОННЫЙ НАСОС ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОЙ ОЧИСТКИ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ ДВУХФАЗНОГО ЭМИССИОННОГО ДЕТЕКТОРА РЭД-100

© 2025 г. И. С. Александров^{a, b}, В. А. Белов^{a, c}, А. И. Болоздыня^{a, *}, А. А. Васин^a,
А. В. Галаванов^{a, d}, Ю. В. Гусаков^{a, d}, А. Г. Коваленко^{a, d}, Е. С. Козлова^a, А. М. Коновалов^{a, e},
В. Н. Корноухов^{a, f}, А. В. Кумпан^a, А. В. Лукьяшин^a, А. В. Пинчук^a, О. Е. Разуваева^{a, c},
Д. Г. Рудик^a, Г. Е. Симаков^{a, c}, В. В. Сосновцев^a, А. В. Хромов^{a, b}, А. В. Шакиров^a,
А. В. Этенко^{a, c}

^a Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”
Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31

^b Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 30

^c Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”
Россия, 123098, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

^d Объединенный институт ядерных исследований
Россия, 141980, Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6

^e Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук
Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53

^f Институт ядерных исследований Российской академии наук
Россия, Москва, 117312, просп. 60-летия Октября, 7а

* e-mail: aibolozdynya@mephi.ru

Поступила в редакцию 04.06.2024 г.

После доработки 21.01.2025 г.

Принята к публикации 24.01.2025 г.

Статья посвящена описанию модернизации стандартного мембранных насоса для непрерывной циркуляционной очистки благородных газов, жидкая фаза которых используется как рабочая среда эмиссионных детекторов с целью обеспечения плавной регулировки потока очищаемого газа в пределах 8–15 литров в минуту.

DOI: 10.31857/S0032816225020178, EDN: GLDKFB

1. ВВЕДЕНИЕ

Двухфазные эмиссионные детекторы, введенные в экспериментальную физику в Московском инженерно-физическом институте (МИФИ) [1–3], за полвека своего развития нашли широкое применение в экспериментах по поиску темного вещества во Вселенной [4], по регистрации нейтрино высоких энергий для исследования нейтринных осцилляций, по поиску эффекта двойного безнейтринного бета-распада [4, 5], по обнаружению эффекта упругого

когерентного рассеяния относительно малоэнергетических реакторных электронных антинейтрино на атомных ядрах (УКРН) в экспериментах на АЭС [6, 7]. Для решения последней задачи в НИЯУ МИФИ разработан и построен двухфазный эмиссионный детектор РЭД-100, прошедший испытания на Калининской АЭС [7, 8].

Обнаружение УКРН на АЭС требует эффективной регистрации относительно слабых ионизационных сигналов (вплоть до одиночных электронов) в массивной (сотни килограммов) рабочей среде (жидкий аргон или ксенон). При

этом необходимо использовать специальную технологию плавно регулируемой циркуляционной очистки сжиженных благородных газов от электроотрицательных примесей для обеспечения оптимальной для используемого геттера скорости прокачки газа в зависимости от режима работы детектора [9]. Такая очистка осуществляется путем многократного пропускания рабочих сред на основе благородных газов через горячие металлические геттеры типа SAES MonoTorr [10] при давлении порядка 1 атм. со скоростью 8–15 литров/мин. Однако используемые в таких установках циркуляционные насосы типа KNF N143SV.12E обеспечивают только постоянную скорость прокачки газов при атмосферном давлении величиной порядка 23 литра в минуту. Регулирование потока очищаемого газа с помощью внешних вентиляй приводит к перегрузке мембран циркуляционного насоса и существенному ограничению их времени службы. В данной работе разработан метод плавной регулировки потока газа с помощью внешнего электронно-управляемого асинхронного двигателя для организации циркуляционной очистки благородных газов с помощью горячих металлических геттеров.

2. ЦИРКУЛЯЦИОННАЯ СИСТЕМА ОЧИСТКИ РЭД-100

Технология непрерывной очистки рабочей среды двухфазного эмиссионного детектора РЭД-100 на сжиженных благородных газах заключается в последовательном выполнении следующих операций и повторении этой последовательности в течение длительной (несколько месяцев) непрерывной работы детектора [11]:

- отбор порции рабочей жидкости из детектора;
- испарение порции жидкости при пропускании через сильфонный теплообменник;
- пропускание образовавшейся порции газа через горячий металлический геттер типа SAES MonoTorr;
- возврат очищенной порции газа в детектор путем прокачки в обратную сторону через сильфонный теплообменник, где за счет теплообмена с испаряемой порцией жидкости происходит конденсация жидкости, возвращаемой после очистки в детектор.

Экстракция жидкой порции аргона из детектора и возврат очищенной геттером газообразной порции газа в детектор осуществляется

одним циркуляционным насосом по замкнутому контуру. При этом встречные потоки холодного и теплого газа обмениваются теплом в двойном сильфонном рукаве, который обеспечивает эффективный теплообмен между встречными потоками испаряющейся жидкой в начальной фазе порции благородного газа и ожидаемой из газа после пропускания через геттер чистой газовой порцией, возвращаемой в детектор. Для обеспечения эффективной очистки газа от электроотрицательных примесей скорость газового потока через горячий металлический геттер типа SAES MonoTorr не должна превышать 15 литров газа в минуту при атмосферном давлении. Для циркуляции рабочего газа через геттер используется мембранный циркуляционный насос типа KNF N143SV.12E, который при атмосферном давлении, согласно паспорту, обеспечивает постоянную скорость прокачки 23 литра в минуту [12]. Для согласования потоков очищаемого газа в РЭД-100 первоначально использовалась система вентиляй, закорачивающих “вход” и “выход” насоса для понижения общей скорости прокачки до необходимой рабочей величины. Однако такой метод регулировки оказывает большую нагрузку на мембрану циркуляционного насоса, что приводит к значительному сокращению срока ее службы. С целью решения этой проблемы была разработана система привода в действие циркуляционного насоса с помощью внешнего двигателя, оснащенного плавной электронно-регулируемой скоростью вращения ротора.

3. МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ ЦИРКУЛЯЦИОННЫЙ НАСОС

Для обеспечения плавной регулировки скорости прокачки циркуляционный насос KNF N143SV.12E был оборудован внешним приводом, как показано на рис. 1. В качестве внешнего привода использовался двигатель для компрессоров домашних холодильников Atlant 1BA6745-2-0025-01 производства ЗАО АТЛАНТ (Белорусия) [13, 14], в котором скорость вращения ротора управляется электронным образом. Схема питания внешнего привода и регулировки скорости вращения ротора двигателя показана на рис. 2.

Для управления частотой вращения ротора двигателя применяется фазоимпульсный метод, что позволяет обойтись без силового преобразователя

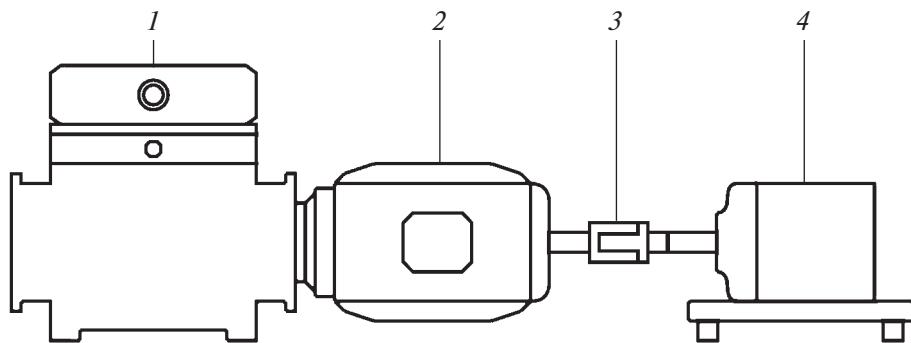


Рис. 1. Циркуляционный мембранный насос 1 со стандартным приводом KNF N143SV.12E 2, приводимый в действие через муфту 3 с помощью электронно-управляемого асинхронного электродвигателя Atlant 1BA6745-2-0025-01 с плавной регулировкой скорости вращения ведущего вала 4.

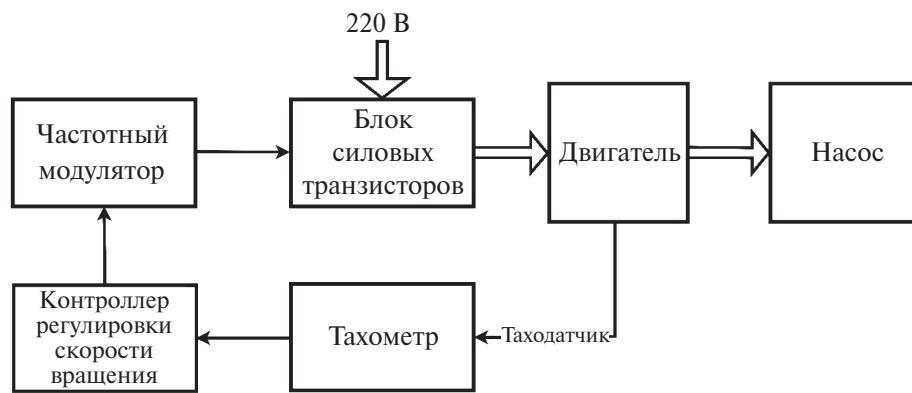


Рис. 2. Схема управления частотой вращения асинхронного электродвигателя Atlant 1BA6745-2-0025-01.

частоты и запускать синхронный двигатель в асинхронном режиме. Центральной частью схемы регулятора скорости оборотов ротора является частотный модулятор, собранный на микросхеме TDA1085, которая задает циклограмму управления обмотками двигателя с помощью набора силовых транзисторов. Таким методом обеспечивается управление вращающим моментом на валу независимо от скорости вращения, что особенно важно в данном случае.

Для контроля реальной частоты вращения предусмотрена обратная связь. Сигнал со встроенного в двигатель тахометра поступает на встроенный в микросхему частотомер. Для достижения и стабилизации скорости вращения на необходимом уровне используется контроллер скорости вращения на основе пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора (ПИД-регулятора [15]), сравнивающего сигнал с тахометром с целевым значением, задаваемым потенциометром. Стандартная схема регулятора позволяет управлять двигате-

лем в диапазоне частот вращения ротора от 100 до 12000 об/мин. В нашем случае, исходя из обеспечения необходимой производительности насоса, оптимальным является более узкий диапазон от 300 до 400 об/мин. Поэтому схема блока регулировки оборотов была модифицирована.

Модернизированная версия циркуляционного насоса была испытана в течение трех недель непрерывной работы детектора РЭД-100, заполненного жидким аргоном массой 100 кг. Скорость прокачки газа через горячий металлический геттер SAES MonoTorr регулировалась с помощью электронного блока управления двигателем Atlant 1BA6745-2-0025-01 так, чтобы поток газа через геттер составлял 9–10 литров газа в минуту при давлении 1.2 атм. При такой скорости прокачки благородного газа время жизни квазисвободных электронов порядка 1 мс достигается в рабочей жидкости детектора массой порядка 100 кг примерно за 2–3 недели непрерывной работы циркуляционной системы очистки рабочей среды.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе разработана методика плавной регулировки потока при циркуляционной очистке благородного газа, используемого в качестве рабочей среды двухфазного эмиссионного детектора. Экспериментальные исследования показали, что циркуляционная очистка с помощью модернизированной версии циркуляционного насоса KNF N143SV.12E эффективна, обеспечивает необходимую безопасность работы циркуляционного насоса и может быть использована в длительных экспериментах с эмиссионными детекторами на сжиженных благородных газах.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность руководству Института ядерной физики и технологий НИЯУ МИФИ за помощь в проведении работ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках контракта №22-12-00082.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долгошин Б.А., Лебеденко В.Н., Родионов Б.У. // Письма в ЖЭТФ. 1970. Т. 11. С. 513.
2. Болоздыня А.И., Егоров О.К., Коршунов А.А., Мирошниченко В.П. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1977. Т. 25. № 9. С. 401.
3. Bolozdyna A., Egorov V., Rodionov B.U., Miroshnichenko V.P. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1995. V. 42. № 4. P. 565.
4. Aalbers J., AbdusSalam S.S., Abe K., Aerne V. et al. // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2023. V. 50 (1). P. 013001. <https://dx.doi.org/10.1088/1361-6471/ac841a>
5. Akimov D.Y., Bolozdynya A.I., Buzulutskov A.F., Chepel V. Two-Phase Emission Detectors. Singapour: World Scientific Publishing Co., 2021. <http://doi.org/10.1142/12126>
6. Акимов Д.Ю., Белов В.А., Болоздыня А.И., Ефременко Ю.В. и др. // УФН. 2019. Т. 189. № 2. Р. 173.
7. Chang Cai, Guocai Chen, Jiangyu Chen, Fei Gao et al. (RELICS Collaboration) // Phys. Rev. D. 2024. V. 110. P. 0720112024. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.110.072011>
8. Акимов Д.Ю., Александров И.С., Белов В.А., Болоздыня А.И. и др. // ПТЭ. 2017. № 2. С.22.
9. Акимов Д.Ю., Белов В.А., Болоздыня А.И., Васин А.А. и др. // ПТЭ. 2019. № 4. С. 5.
10. SAES Pure Gas. MonoTorr: Heated Getter Purifies. http://www.saespuregas.com/Library/specifications-brochures/MonoTorr_Brochure.pdf
11. Akimov D.Y., Alexandrov I.S., Alyev R.R., Belov V.A. et al. // J. Inst. IOP Publishing. 2022. V. 17. № 11. Р. T11011. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.15516>
12. N 143 Series process vacuum pumps and compressors, <https://kiptm.com/wp-content/uploads/2020/07/25/knf-n-143-category.pdf>
13. Atlant 90167452501 (1BA6745-2-0025-01) Электродвигатель для стиральной машины https://intercomnn.ru/catalog/elektrodvigateli_dlya_stiralnykh_mashin/90167452501/
14. Двигатель для стиральных машин Atlant 1BA6745 <https://moskva.samodelkin-mag.ru/stiralnyie-mashiny/dvigateli/dvigatel-dlya-stiralnyix-mashin-atlant-1va6745>
15. ПИД-регулятор. Приводная техника и средства автоматизации. VEDA MC <https://drives.ru/stati/pid-regulyator/>