

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА РАБОТУ ГМ-КРИОРЕФРИЖЕРАТОРА ЖИДКОВОДОРОДНОЙ МИШЕНИ УСТАНОВКИ ВМ@N

Д. И. Климанский^{a, б, 1}, И. А. Архаров^б, М. М. Шандов^а, С. М. Пиядин^а

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва

Для исследований процессов столкновения ядер на выведенных пучках тяжелых ионов ускорительного комплекса NICA на физической установке ВМ@N необходима мишень с жидким водородом. Важным требованием эксперимента является размещение мишени непосредственно на границе области однородного магнитного поля 1 Тл анализирующего магнита СП-41. В соответствии с данным требованием возникает ряд ограничений, связанных с работой ГМ-криорефрижератора и систем криогенной мишени в магнитном поле, а также влиянием элементов самой мишени на однородность поля. Приводится краткий обзор источников по данному вопросу, представлены собственные исследования по указанным проблемам: расчеты и прогнозы, варианты и методы их решения.

To study the processes of collision of nuclei in the extracted beams of heavy ions of the NICA accelerator complex at the ВМ@N physical facility, a target with liquid hydrogen is needed. An important requirement of the experiment is the placement of the target directly on the boundary of the region of a uniform magnetic field of 1 T of the analyzing magnet SP-41. In connection with this requirement, a number of restrictions arise related to the operation of the GM cryocooler and systems of the cryogenic target in a magnetic field, as well as the effect of the elements of the target itself on the field uniformity. We provide a brief review of the literature on this issue, present our own research on these problems: calculations and forecasts, options and methods for their solving.

PACS: 29.20.–с

ВВЕДЕНИЕ

Криорефрижераторы (криокулеры, криоголовки) Gifford–McMahon (GM) широко зарекомендовали себя при создании различных типов исследовательских криостатов для охлаждения криопанелей, инфракрасных и гамма-детекторов, сверхпроводящих систем, реконденсации гелия и других газов, в том числе и водорода.

В Лаборатории физики высоких энергий (ОИЯИ, Дубна) ГМ-криорефрижераторы нашли свое применение в качестве источника холода в жидководородных мишенях (ЖВМ). Мишени с использованием таких машин получились компактными,

¹E-mail: klimanskiy@jinr.ru

простыми в обслуживании, они позволяют в короткие сроки перемещать мишени с эксперимента на эксперимент и работать продолжительное время без остановок. Для их работы требуется только наличие электропитания, охлаждающей воды или воздушного охлаждения. Холодопроизводительность таких машин не зависит от их ориентации. Из недостатков применения криокулеров можно назвать лимит холодопроизводительности и ограничения при работе в магнитных полях.

В более ранних типах ЖВМ применялась прямая подача жидкого водорода в сосуд мишени, что требовало больших объемов водорода. Позже была реализована система ожижения водорода жидким гелием в конденсаторе с двойным теплообменом, данное решение значительно понизило количество используемого водорода до 3 нм³ и повысило уровень безопасности при эксплуатации мишени. Но все же эти установки требовали постоянного расхода жидкого гелия 20 л/сут и жидкого азота для охлаждения экранов, что, в свою очередь, требовало соответствующей инфраструктуры и резко ограничивало ЖВМ в автономности, мобильности, эффективности и, соответственно, безопасности. Подробную информацию о типах ЖВМ и их применении можно найти в работах [1–4].

Первая мишень ЖВМ D40/L350 (параметры внутреннего сосуда в мм: диаметр/длина) с применением криорефрижератора RDK-415D (1,5 Вт при 4,2 К) производства компании SHI-Cryogenics была разработана коллективом ЛФВЭ в составе Ю. Т. Борзунова и А. В. Константинова для физического эксперимента ФОДС-2 ИФВЭ (Протвино) в 2016 г. Тесты показали ее успешную работу на водороде и дейтерии, а также невозможность работы с гелием из-за нехватки холода для его ожижения. Минимальная достигнутая температура на гелии составила 9 К [1, 2].

Схема работы криогенной мишени показана на рис. 1. Чистый водород подается из системы ресиверов (9) на предварительное охлаждение по трубке, навитой на тепловой экран (3) первой ступени криокулера (7), охлаждается и поступает на ожижение в конденсатор (6), расположенный на второй ступени криоголовки (7). Сжиженный водород стекает в сосуд мишени (1) и находится под воздействием пучка ускоренных частиц. Испаряющийся в сосуде водород реконденсируется в конденсаторе (6).

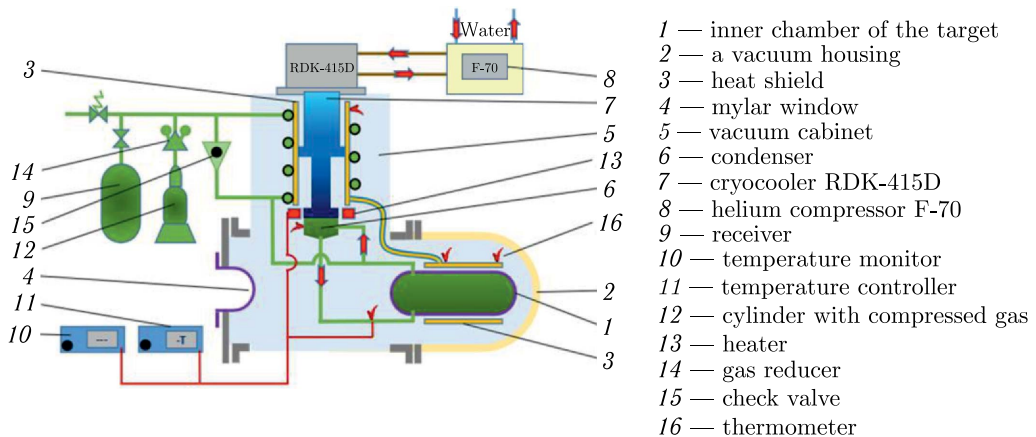


Рис. 1. Схема криогенной мишени с криорефрижераторным охлаждением

Избыток холода компенсируется нагревателем (13), управляемым контроллером (11). Температура измеряется термометрами сопротивления ТВО (16) [5] и отображается температурным монитором (10).

Вторая мишень ЖВМ D40/L350 разработана в 2021 г. коллективом ЛФВЭ в составе Ю. Т. Борзунова, Д. И. Климанского и Ю. В. Гусакова для физического эксперимента VM@N ускорительного комплекса NICA по аналогичной технологии. Дополнительно был разработан контроллер температуры (рабочая группа под руководством Д. О. Понкина) и конденсатор, позволяющий работать мишени в любом положении вправо от оси пучка от вертикали до горизонтали. По данным, полученным в эксперименте, мишень имеет запас холода 55% от общей мощности криокулера на водородном уровне, что составляет 11–12 Вт.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

По условию проведения эксперимента VM@N граница области однородного магнитного поля анализирующего дипольного электромагнита СП-41 должна проходить по центру сосуда с водородом мишени (рис. 2).

Конструкция мишени выполнена очень компактно (объем вакуумного кожуха составляет 10 л), расположение всех элементов полностью соответствует схеме на рис. 1. Криоголовка находится в 15 см от сосуда мишени с жидким водородом и при размещении в зоне проведения эксперимента VM@N, соответственно, испытывает постоянное воздействие сильного магнитного поля (рис. 3).

По информации из разных источников, замечена чувствительность криорефрижераторов GM к магнитному полю. В работе [6] сообщается, что производитель Sumitomo рекомендует, чтобы область двигателя не подвергалась воздействию поля выше 0,03 Тл (30 мТл). Поле 0,03–0,05 Тл будет отрицательно влиять на срок службы, а поле выше 0,07 Тл может вызвать остановку двигателя. Также, из опыта

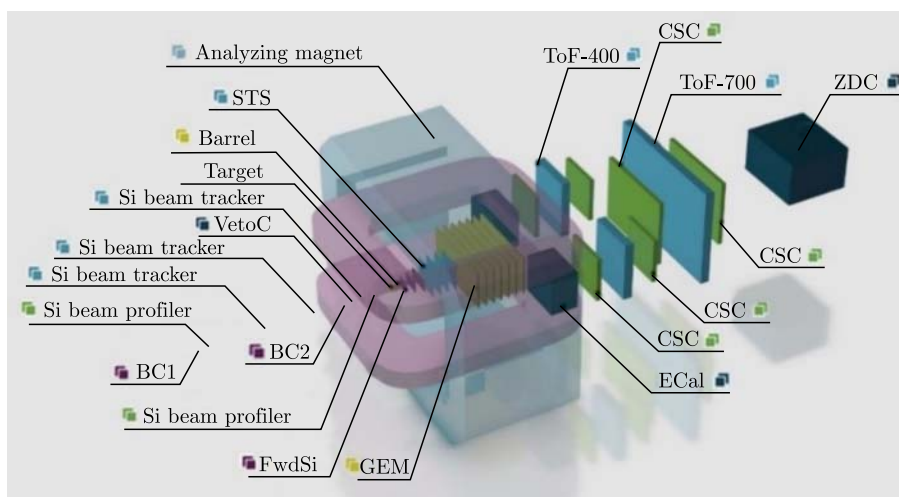


Рис. 2. Структура установки VM@N (фото с сайта <https://bmn.jinr.ru/about/>)

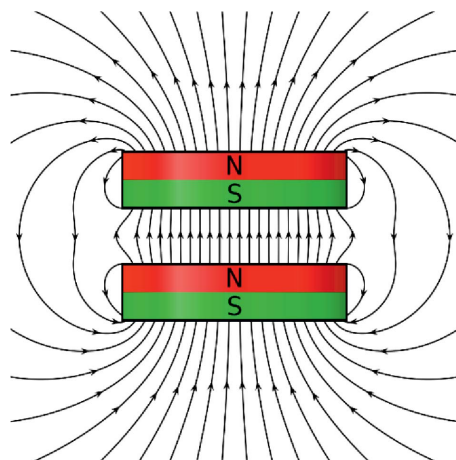


Рис. 3. Магнитное поле дипольного магнита (фото с сайта <https://wikipedia.org>)

исследований авторов, видно, что при воздействии на редкоземельный регенератор полем 1 Тл холодильная мощность криокулера уменьшается на 22–49%.

При проведении эксперимента SRC на установке VM@N было решено протестировать работу мишени с криокулером в магнитном поле. Мишень с наклоном 12° от горизонта была помещена в центр анализирующего магнита СП-57 (максимальное поле меньше, чем в СП-41). На работающей мишени без водорода с отключенным нагревателем при минимально достижимой температуре 9 К с шагом 50 Гс и выдержкой 5 мин производилась оценка изменения температурного поля (точность измерения 0,1 К) криокулера и мишени под влиянием магнитного поля. При величине поля 300 Гс появился посторонний звук, исходящий из области двигателя криокулера. После 1 мин работы магнитное поле было отключено, посторонний звук сразу пропал. Изменение температур за время измерений не наблюдалось.

Данный результат подтверждает информацию производителя и результаты, изложенные в работе [6]. Магнитное поле выше 0,03 Тл не является оптимальным для эксплуатации криокулера и ведет к его износу и снижению ресурса. Данный результат также подтверждает, что мишень с имеющимся криокулером не может использоваться в эксперименте без дополнительного оборудования и оснастки. В данной ситуации можно предложить несколько способов частичного решения описанной проблемы.

В работе [7] представлены результаты экранирования двигателя листами стали Fe37-3FN толщиной 0,4 мм и шириной 210 мм, свернутыми в рулон диаметром 16 см. Согласно результатам испытаний, экран из трех слоев стали уменьшил поле на 61%: с 26,7 до 10,5 мТл. Однако в работе не сообщается о способе укладки слоев экрана, который может быть исполнен в виде обечаек (цилиндров), надетых друг на друга, или же в виде намотки в три слоя из цельного листа.

Применение экрана для экранирования двигателя криорефрижератора мишени вызывает большие сомнения. В центральной области магнита (области однородности) величина поля составляет 1 Тл. За пределами этой области поле все еще очень большое, для чего потребуются экран намного большей толщины, чем представленный в работе [7]. Данный экран может оказать значительное влияние на однородность

поля внутри магнита, что недопустимо по условию эксперимента. Результаты по работе экранов в поле до 1 Тл и влиянию экранов на однородность поля в работах не приводятся.

Применение пульсационной трубы той же мощности вместо GM-криорефрижера-тора не является решением, поскольку пульсационная труба имеет идентичную двигательную часть и, соответственно, попадает под аналогичные ограничения по магнитному полю, к тому же может использоваться только в строго вертикальном положении.

Вариант исполнения криорефрижера с вынесенной двигательной частью (до 50 см) имеет холодопроизводительность на 10% ниже, чем у аналогичной машины в стандартном исполнении. Вынесенную двигательную часть можно экранировать без вреда для однородности, однако регенератор и вытеснитель I и II ступени все равно будут находиться под воздействием поля 1 Тл, что приведет к потери холодильной мощности криокулера еще на 22–49% [6]. Общая потеря холода может составить 30–55% от номинальной холодильной мощности стандартной машины. В нашем случае данное решение неоправданно.

Подводя итоги, можно выделить следующие первостепенные задачи, выполнение которых позволит найти оптимальное решение по данной проблеме. Необходимо:

- составить карту магнитного поля анализирующего дипольного электромагнита СП-41 и пространства вокруг него, определить безопасное место для размещения криокулера и водородной мишени;

- пересмотреть конструкцию мишени, в которой подача водорода из вынесенной криокулерной части должна осуществляться в мишенную часть посредством криогенного трубопровода, в связи с чем нужно провести детальный гидравлический и тепловой расчет, показывающий, что данная конфигурация не превысит лимит холодопроизводительности криокулера.

Дополнительно в качестве более детального подхода к решению проблемы необходимо:

- выполнить моделирование экранов в магнитном поле, оценить влияние экрана на однородность и сопоставить полученные результаты с имеющимися экспериментальными данными (данная задача может быть реализована с помощью программ ANSYS Maxwell и OPERA-3D);

- оценить влияние магнитного поля на показания и работу используемых датчиков температуры [5], что также является важной и актуальной задачей, о которой в работе не упоминается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные измерения в магните СП-57 в эксперименте SRC на установке VM@N и информация из источника [6] показывают невозможность работы криокулера и мишени в данной конфигурации в магнитном поле выше 0,03 Тл, что не отвечает требованиям проведения эксперимента VM@N в программе с водородной мишенью. Использование экранов из стали вокруг двигателя криокулера, предлагаемых в работе [7], не представляется возможным вблизи магнита ввиду возможности

его влияния на однородность магнитного поля. Для решения данной задачи требуется снять карту магнитного поля анализирующего магнита СП-41 и пространства вокруг него, определить безопасное место расположения криокулера, пересмотреть конструкцию мишени и провести расчет теплопритоков, показывающий, что новая конфигурация способна обеспечить ожижение водорода и поддержание его уровня.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-38-90275).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Klimanskiy D. I., Arkharov I. A.* Cryogenic Targets of the Lightest Gases (Hydrogen, Deuterium and Helium-4) with GM Cryocooler for Experiments of High Energy Physics // *Refrig. Sci. Tech.* 2019. No. 15. P. 38–44; <http://dx.doi.org/10.18462/iir.cryo.2019.0085>.
2. *Konstantinov A., Borzunov U., Shimanskiy S., Varava A.* Liquid Cryogen Targets for Experiments in Nuclear Relativistic and Particle Physics // 2nd IIR Intern. Conf. on Cryogenics. 2012.
3. *Борзунов Ю. Т., Голованов Л. Б., Цвинев А. П., Мазарский В. Л.* Технология изготовления криогенных мишеней с использованием лавсана и пенопласта. Сообщ. ОИЯИ № 8-8991. Дубна, 1975.
4. *Агапов Н. Н., Баландиков Н. И., Белушкин В. А. и др.* Криогенные приборы и устройства в ядерной физике. М.: Энергоиздат, 1982. 200 с.
5. *Дацков В. И., Петрова Л. В., Цвинева Г. П.* Криогенные термометры на основе резисторов типа ТВО и их применение. Препринт ОИЯИ Р8-87-604. Дубна, 1987.
6. *Kostrov E. et al.* Performance Test of a G–M Cooler in Magnetic Field // *Phys. Proc.* 2015. V. 67. P. 440–444.
7. *Kostrov E. et al.* Magnetic Field Operation and Shielding of a G–M Cryocooler // *IEEE Trans. Appl. Superconduct.* 2016. V. 26, No. 4. P. 1.

Получено 18 ноября 2022 г.