

УДК 621.384

ИМПУЛЬСНЫЙ НЕЙТРОННЫЙ ИСТОЧНИК НА ОСНОВЕ ИСПАРИТЕЛЬНО-СКАЛЫВАЮЩЕЙ РЕАКЦИИ НА БАЗЕ ПРОТОННОГО СИНХРОТРОНА У-1.5

© 2022 г. М. В. Ковальчук¹, Н. Е. Тюрин¹, С. В. Иванов^{1,*}, А. П. Солдатов¹

¹ Институт физики высоких энергий им. А.А. Логунова НИЦ “Курчатовский институт”, Протвино, Россия

*E-mail: sergey.ivanov@ihep.ru

Поступила в редакцию 17.03.2022 г.

После доработки 15.04.2022 г.

Принята к публикации 19.04.2022 г.

Представлен проект импульсного нейтронного источника на основе испарительно-скалывающей реакции и протонного пучка, ускоренного до энергии 1.32 ГэВ в действующем быстроциклическом протонном синхротроне У-1.5 НИЦ КИ – ИФВЭ. Проект позволит в короткое время с минимальными затратами расширить возможности для проведения прикладных исследований на пучке У-1.5 – установке (длина орбиты 99.16 м), также используемой как кольцевой инжектор (бустер) для большого протонного синхротрона У-70 (1.487 км). Источник будет ориентирован на приоритетное применение времяпролетных нейтронно-физических методик.

DOI: 10.31857/S0023476122050101

ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции в развитии науки, техники и технологии во многом связаны с прогрессом в исследованиях кристаллических и аморфных материалов естественного и искусственного происхождения. Успех в решающей степени зависит от наличия методов, способных исследовать структуру и свойства веществ, материалов и изделий в различных пространственных и временных масштабах. Использование пучков нейтронов – один из основных методов таких исследований, комплементарный к методам на основе синхротронного излучения. Для получения высокоинтенсивных потоков нейтронов используются:

- реакции деления (исследовательские, реже промышленные ядерные реакторы);
- ядерные реакции, инициированные пучками ускоренных заряженных частиц.

Основная доля подобных исследований в мире проводится на ядерных реакторах. Большая часть этих реакторов была сооружена в 1960–1970 гг. Регламентный срок службы этих установок (реакторов) истек или истекает в ближайшее десятилетие. Ввод в эксплуатацию новых исследовательских установок, основанных на реакторной технологии получения нейтронных потоков, в настоящее время событие редкое, а в будущем – маловероятное в связи с экологическим движением за сохранение окружающей среды.

Дальнейшие исследования с использованием нейтронов в значительной степени связываются с установками, основанными на протонных уско-

рителях. При этом по плотности потоков нейтронов такие источники при мегаваттной мощности пучка и энергии протонов 1–1.5 ГэВ зачастую превосходят исследовательские ядерные реакторы. Отметим, что эксплуатация и вывод (снятие) из эксплуатации нейтронных установок на основе ускорительных технологий – существенно более простая задача, чем для установок на ядерных реакторах.

ЦЕЛЬ ПРОЕКТА

Целью проекта является создание импульсного нейтронного источника (ИНИ) на основе реакций испарительно-скалывающего типа (*spallation*), генерируемых пучком протонов со средней мощностью до 3 кВт в результате его взаимодействия с протяженными плотными мишенями. Установка создается на базе действующего ускорительного комплекса У-70 НИЦ КИ – ИФВЭ (Протвино, Московская область) и предназначена для проведения исследований свойств веществ, материалов и изделий в нано- и субнанометровом диапазоне, а также для исследований в области ядерной физики. Установка будет ориентирована на приоритетное применение времяпролетных нейтронно-физических методик.

Успешная реализация проекта позволит уменьшить имеющийся дефицит исследовательских нейтронных источников в России и мире. Будет создана научно-техническая база для практической подготовки исследовательских и инже-

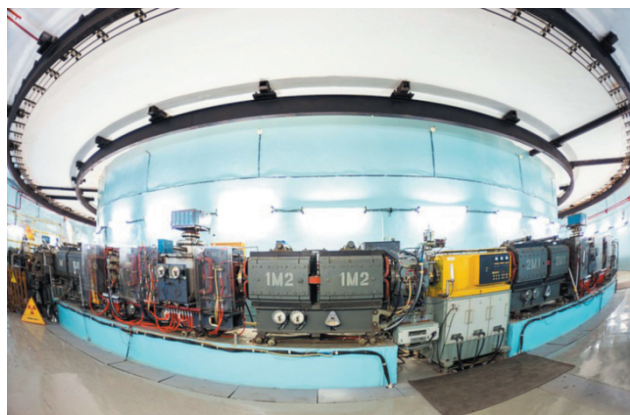


Рис. 1. Протонный синхротрон У-1.5.

нерных кадров в области нейтронных методов исследований.

Можно утверждать, что создаваемая установка является прототипом импульсного источника нейтронов (предложение 2010 г., НИЦ КИ – ИФВЭ, проект ОМЕГА), рассчитанного на работу с пучками протонов мегаваттной мощности [1]. Именно по этой причине для предложенной установки используются названия “ИНИ ОМЕГА” или “прототип ИНИ ОМЕГА”.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Проект опирается на успешный отечественный и мировой опыт создания и эксплуатации испарительных источников нейтронов, также основанных на кольцевых резонансных ускорителях протонов. К их числу относится нейтронный источник ГНЕЙС (синхроциклотрон 1 ГэВ; ПИЯФ, Россия) [2]. Зарубежными аналогами с

Таблица 1. Параметры протонного синхротрона У-1.5

Параметр	Значение
Энергия инжекции, МэВ	30
Энергия ускоренного пучка, ГэВ	1.32
Длина орбиты, м	99.16
Интенсивность пучка, протонов/сгусток	$(1-4) \times 10^{11}$
Пакетно-импульсный режим	
– число импульсов (сгустков) пучка в пакете	1–29
– период следования импульсов внутри пакета, мс	60
– частота следования импульсов внутри пакета, Гц	$50/3 = 16_{2/3}$
– период следования пакетов сгустков, с	8–10
Длительность импульса (сгустка), нс	80–100

заметно большей мощностью драйверного пучка являются источники SINQ (изохронный циклотрон 590 МэВ; PSI, Швейцария) [3], ISIS (синхротрон 0.8 ГэВ; RAL, Великобритания) [4], J-PARC (синхротрон 3 ГэВ, JAEA/КЕК, Япония) [5].

Проект предусматривает создание исследовательского ИНИ ОМЕГА на основе реакций испарительно-скалывающего типа, генерируемых пучком протонов с энергией 1.3–1.5 ГэВ и мощностью до 3 кВт. Ожидается достижение высокого показателя “результат/затраты” и короткого срока реализации с уменьшенными техническими рисками. Этому есть две предпосылки.

С одной стороны, будут использованы профильные компетенции и инженерная инфраструктура НИЦ КИ – ИФВЭ в области создания и эксплуатации протонных ускорителей, каналов транспортировки и формирования выведенных пучков заряженных частиц, экспериментальных физических установок с фиксированными внешними мишенями и сопровождающих разделов радиационной физики и техники.

С другой стороны, в высокой степени готовности к работе в составе ИНИ находится его наиболее сложный и дорогостоящий компонент – интенсивный ускоритель заряженных частиц (протонов). В действующем Ускорительном комплексе У-70 давно и успешно эксплуатируется протонный синхротрон У-1.5 (рис. 1), являющийся кольцевым инжектором (бустером) для большого протонного синхротрона У-70. ИНИ ОМЕГА будет размещен вблизи У-1.5 в помещении № 3Н на нижнем этаже комплекса зданий “Бустер” (рис. 2). Технические параметры синхротрона У-1.5 в его нынешнем состоянии, актуальные для создания ИНИ, приведены в табл. 1. На основе этой таблицы можно сделать следующие заключения.

В-первых, энергия протонного пучка У-1.5, равная 1.32 ГэВ, находится вблизи пологого максимума (равного примерно 25) удельного выхода “нейтрон/протон/ГэВ” для протяженной плотной мишени [6]. Именно по этой причине энергии драйверных пучков ИНИ на основе протонных синхротронов, действующих в мире, приходится на диапазон от 0.8 ГэВ (ISIS, Великобритания) до 3.0 ГэВ (J-PARC, Япония).

Во-вторых, временная (пакетно-импульсная) структура пучка У-1.5, продиктованная условиями инжекции от 1 до 29 сгустков в кольцо У-70, также удачно подходит к требованиям ИНИ с короткими импульсами драйверного протонного пучка. Действительно, длительность одного импульса (сгустка) пучка из У-1.5 не превышает 0.1 мкс. Это заметно меньше характерного времени замедления нейтронов в легком замедлителе, не превышающего 5–10 мкс (зависит от размеров и конструкции мишени). Поэтому форма нейтронных импульсов будет слабо зависеть от формы сгустков драйверного протонного пучка. В то



Рис. 2. Комплекс зданий “Бустер”.

же время периодичность следования протонных сгустков из У-1.5, равная 60 мс (частота следования 50/3 Гц), благоприятна для использования нейтронно-физических времяпролетных методик. В упоминавшихся выше действующих ИНИ частоты следования импульсов сопоставимы: 50 Гц (ISIS) и 25 Гц (J-PARC).

В-третьих, по техническим причинам сложно ожидать, что достижимая интенсивность пучка в У-1.5 (с учетом его модернизации) превысит 1×10^{12} протонов/сгусток. Поэтому средняя мощность пучка на нейтронгенирующей мишени не превысит 1–2 кВт. С одной стороны, это радикально упрощает ее конструкцию, что привлекательно для использования имеющихся зданий и сооружений комплекса “Бустер” (рис. 2). С другой стороны, ИНИ ОМЕГА не сможет генерировать рекордно большие потоки нейтронов. Это неизбежно ограничивает область его применения до аналитических нейтронно-физических исследований не очень плотных объектов и исследований в области ядерной физики. Исследования по экстремальному радиационному материаловедению оказываются недоступными.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЕКТА

Проектом предусмотрены модернизация и техническое перевооружение основных технологических систем действующего протонного синхротрона У-1.5 и его инжектора – линейного ускорителя протонов Урал-30 (рис. 3) с целью повышения интенсивности протонного пучка. Перечень создаваемых и модернизируемых объектов следующий:

- источник отрицательных ионов водорода (H^-) для перехода к схеме перезарядной инжекции в У-1.5, позволяющейкратно поднять его интенсивность;

- ключевые технологические системы линейного ускорителя Урал-30, такие как модулятор системы ВЧ-питания, система регулирования ВЧ-мощности для компенсации эффекта нагрузки ускоряющих резонаторов током пучка, системы диагностики пучка протонов и ионов H^- ;

- ключевые технологические системы протонного синхротрона У-1.5, такие как прямолинейный участок с перезарядной мишенью для ввода пучка H^- , оборудование ускоряющих ВЧ-станций, системы коррекции магнитного поля и диагностики параметров пучка, импульсные и ударные магниты;

- новый канал транспортировки пучка протонов, выведенных из У-1.5, к нейтронгенирующей мишени;



Рис. 3. Линейный ускоритель Урал-30.

Таблица 2. Основные характеристики драйверного протонного пучка

Параметр	Значение
Энергия ускоренных протонов, ГэВ	1.32–1.50
Число протонов в импульсе (сгустке)	10^{12}
Частота следования импульсов внутри пакета, Гц	$50/3 = 16_{2/3}$
Количество импульсов в пакете	29
Период следования пакетов, с	6.5
Длительность импульса (сгустка) (ширина на полувысоте), нс	50
Мощность пучка (средняя), кВт	1.2
Выход нейтронов, нейтронов/протон	33
Интенсивность нейтронов на свинцовой (вольфрамовой) мишени, нейтронов/с	1.5×10^{14}

Таблица 3. Перечень основных составляющих ИНИ

Обозначение	Название системы
<i>A</i>	Источник отрицательных ионов водорода H^-
<i>B</i>	Линейный ускоритель Урал-30
<i>C</i>	Канал перевода инжектируемого пучка в синхротрон У-1.5
<i>D</i>	Протонный синхротрон (бустер) У-1.5
<i>E</i>	Канал транспортировки драйверного пучка протонов к мишени
<i>F</i>	Нейтронгенерирующая мишенная станция
<i>G</i>	Каналы транспортировки нейтронов и экспериментальные станции

– нейтронгенерирующая мишенная станция, нейтронные каналы с экспериментальными станциями.

В табл. 2 приведены параметры протонного пучка У-1.5 как драйверного пучка для ИНИ ОМЕГА после проведения комплекса перечисленных мероприятий.

Возможность повышения энергии пучка с 1.32 до 1.50 ГэВ и уменьшения периода следования пакетов с 8–10 до 6.5 с (сравните табл. 1 и табл. 2) будет обеспечена новой системой питания кольцевого электромагнита У-1.5, введенной в эксплуатацию в 2021 г.

Оценки показывают, что для драйверного пучка с параметрами из табл. 2 на доступных в комплексе зданий “Бустер” (рис. 2) протонных базах масштаба 20 м исследования по методу времени пролета нейтронов могут проводиться в широком диапазоне энергий нейтронов от тепловых (≥ 0.01 эВ) до промежуточных (≤ 1 кэВ).

Схема планировки ИНИ ОМЕГА показана на рис. 4. Буквенные обозначения основных составляющих, используемые на этом рисунке, сведены в табл. 3.

КАНАЛ ТРАНСПОРТИРОВКИ

Канал транспортировки выведенного из синхротрона У-1.5 протонного пучка в помещении № 3Н комплекса зданий “Бустер” включает в себя начальную часть существующего канала перевода пучка из У-1.5 в У-70 и вновь создаваемый участок в виде ответвления от канала перевода.

В состав канала транспортировки входят пять дипольных магнитов (*D*) и шесть квадрупольных линз (*Q*). Суммарный угол поворота пучка 55.5° . Угол между направлением протонного пучка перед мишенью и продольной осью помещения № 3Н равен 15° . Длина новой части канала – 33 м.

Предварительные расчеты показывают, что полный размер транспортируемого по каналу протонного пучка с геометрическим эмиттансом 25π мм·мрад в горизонтальной и 14π мм·мрад в вертикальной плоскости не будет превышать половину апертуры магнитооптических элементов в обеих поперечных плоскостях. Линейная и угловая дисперсии полностью скомпенсированы. Диаметр круглого пучка, сформированного на входном торце мишени, составляет 22 мм.

МИШЕННАЯ СТАНЦИЯ И ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ КАНАЛЫ

Схема размещения мишенной станции с каналом транспортировки пучка протонов в помещении № 3Н приведена на рис. 5. Мишенный узел закрыт блоками бетонной и стальной радиационной защиты. Из него выходят шесть нейтронных каналов, расположенных с шагом 15° и пронумерованных против хода часовой стрелки цифрами 1–6 на рис. 4. Канал 2 параллелен оси помещения № 3Н.

Центральная часть мишенного узла со снятой радиационной защитой показана на рис. 6. Цифрами обозначены: 1 – водоохлаждаемый герметичный контейнер с вольфрамовой мишенью длиной 0.25 м, 2 – магистраль замкнутой циркуляции обессоленной охлаждающей воды, 3 – шесть слоев отражателя размером $0.1 \times 0.6 \times 0.6$ м³ каждый, 4 – водный замедлитель, 5 – внешний корпус извлекаемого мишенного узла.

На первом этапе реализации проекта планируется создать три экспериментальные станции из шести возможных. Предварительно это:

- нейтронный времяпролетный рефлектометр общего назначения;
- дифрактометр общего назначения;
- стенд для нейтронно-активационного анализа.

Состав и назначение этих или иных экспериментальных установок будут определены на сле-

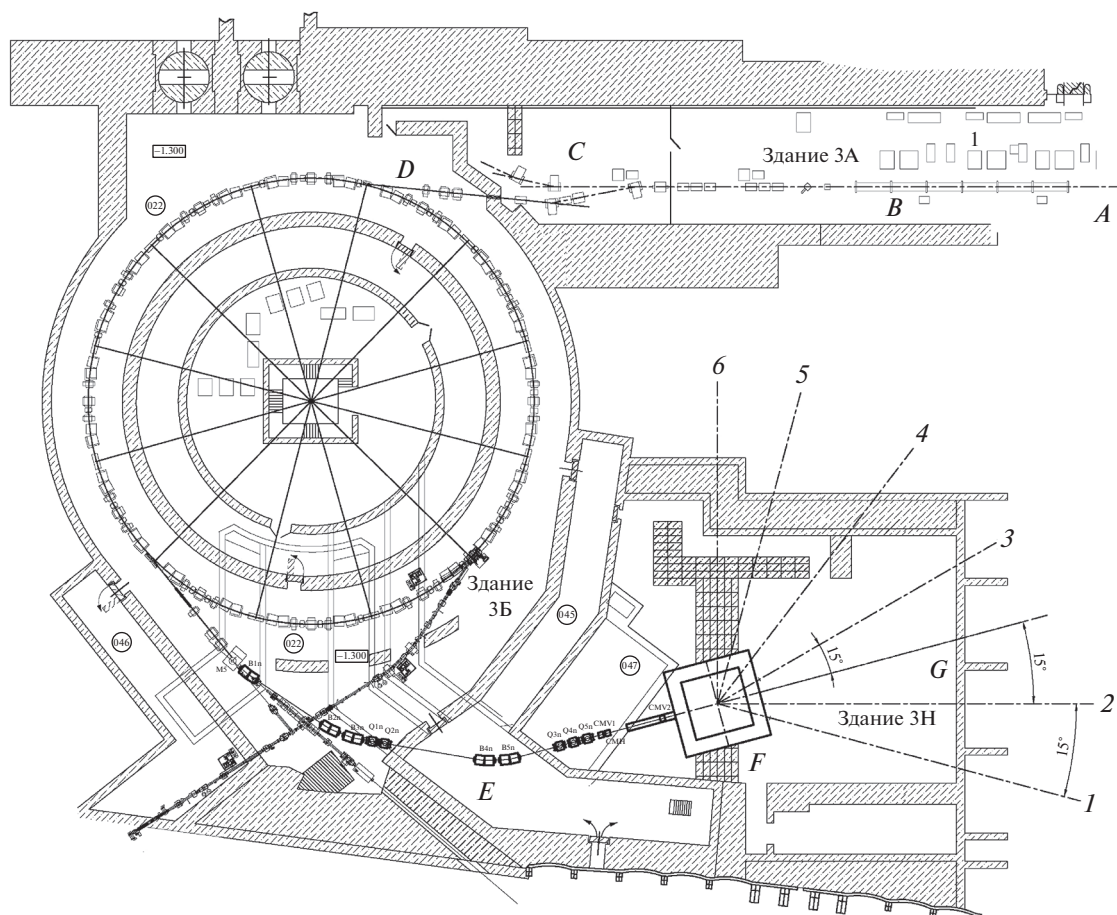


Рис. 4. Схема планировки ИНИ ОМЕГА.

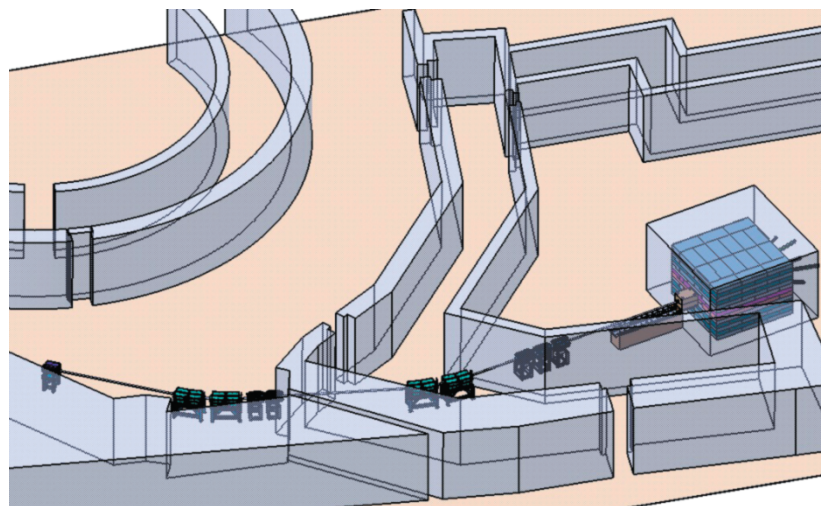


Рис. 5. Схема размещения мишенной станции.

дующих этапах проектирования по результатам обсуждения с научными организациями России, заинтересованными в проведении исследований на ИНИ ОМЕГА в режиме центра коллективного пользования (ЦКП).

В установке также предусмотрена возможность создания в будущем облучательного стенда, предназначенного для исследований радиационной стойкости элементной базы электроники или сечений образования целевых радионуклидов в

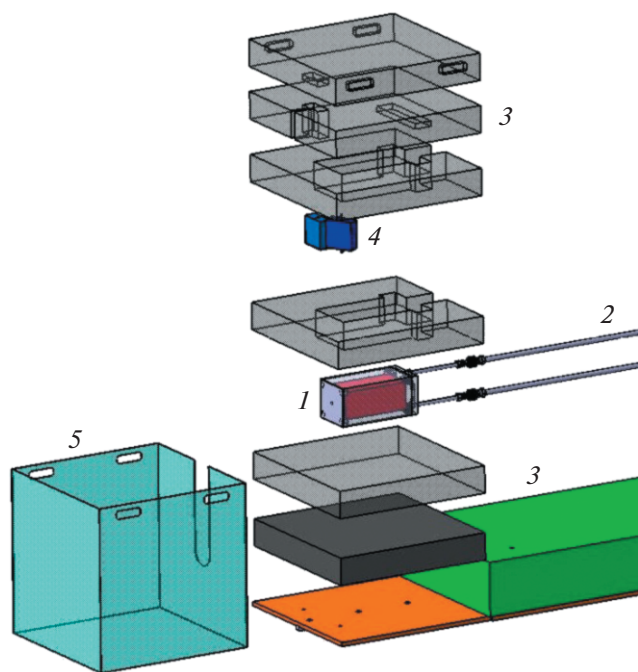


Рис. 6. Центральная часть мишенного узла.

полях как нейтронного, так и протонного излучений (прямое направление по ходу драйверного протонного пучка, рис. 4).

ОЦЕНКА ЭФФЕКТОВ ОТ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА

Проект предлагает создание импульсного нейтронного источника на основе ускорителя заряженных частиц (протонов) как альтернативу источникам нейтронов на базе исследовательских ядерных реакторов малой и средней мощности. У многих из них подходит к концу регламентный срок эксплуатации. В постчернобыльский период сооружение новых исследовательских реакторных установок сопряжено с заметным противодействием экологически ориентированной общественности.

Проект призван ослабить дефицит исследовательских источников нейтронов в России и мире, заметный в настоящее время, и учитывает востребованность нейтронно-физических методов исследования в различных областях современной науки, техники и технологии, в том числе оборонных.

Объект является существенной составляющей национальной научно-технической базы – сети нейтронных источников для консолидации исследовательского сообщества в практической работе с нейтронными инструментами, в том числе в целях отработки и освоения актуальных нейтронно-физических методик, образования и подготовки исследовательских и инженерных кадров для иных (флагманских) установок.

Проект ориентирован на создание мультидисциплинарного ЦКП для сторонних организаций для проведения экспериментальных ис-

следований с помощью импульсных нейтронных потоков.

По размерам и топологии организации экспериментального зала и размещению станций проект позволяет, в отличие от нейтронных источников “mega-science” (где насчитывается от 20 до 50 станций, жестко ориентированных под конкретную методику исследований), оперативно перенастраивать каналы в интересах отдельных групп исследователей. Это достигается созданием нейтронгенирующей мишенной станции с возможностью оптимизации замедлителей и отражателей в интересах конкретной экспериментальной станции для увеличения светосилы нейтронного потока на образце. Кроме того, параметры ускорителя заряженных частиц дают возможность оперативного изменения характеристик первичного (драйверного) пучка протонов (энергия, интенсивность, частота следования циклов сброса и др.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация проекта ИНИ ОМЕГА создаст (с минимальными техническими рисками, ресурсными и временными затратами) уникальную научную установку для скорейшего начала исследований с помощью импульсных потоков не реакторных (*spallation*) нейтронов.

Характеристики нейтронных пучков ИНИ ОМЕГА оптимально подходят для генерации коротких импульсов нейтронов для использования нейтронно-физических времяпролетных методик.

Реализация проекта ИНИ ОМЕГА расширит возможности применения ускорительного комплекса У-70 – крупнейшего в России действующего ускорителя заряженных частиц – для иных актуальных фундаментальных и прикладных исследований с использованием интенсивных пучков первичных и вторичных частиц высоких энергий.

Авторы выражают благодарность сотрудникам НИЦ КИ – ИФВЭ В.И. Гаркуше, А.М. Зайцеву, М.А. Маслову, В.Н. Пелешко и В.Ю. Ферапонтову за помощь в научно-техническом анализе и подготовке материалов статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://www.ihep.ru/files/ИНЕР-2-10.pdf>
2. Щербаков О.А., Воробьев А.С., Иванов Е.М. // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2018. Т. 49. Вып. 1. С. 137.
3. Wagner W., Dai Y., Glasbrenner H. et al. // NIM A. 2006. V. 562. P. 541.
4. Findlay D.J.S., Adams D.J., Broome T.A. et al. // Proc. 10th EPAC, Edinburgh, Scotland. June 26–30, 2006. P. 935.
5. Kobayashi H. // Proc. 10th EPAC, Edinburgh, Scotland. June 26–30, 2006. P. 930.
6. Стависский Ю.А. // Успехи физ. наук. 2006. Т. 176. № 12. С. 1283.