

P9-2009-161

О. В. Савченко

УСКОРИТЕЛЬ-НАКОПИТЕЛЬ  
ДЛЯ ВНЕШНЕЙ ИНЖЕКЦИИ В ФАЗОТРОН ОИЯИ

Савченко О. В.

P9-2009-161

Ускоритель-накопитель для внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ

Предложен и рассмотрен новый вариант внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ на основе использования ускорителя-накопителя, сочетающего в себе обычный режим ускорения  $H^-$ -ионов в центральной области сформированного магнитного поля и их дальнейшее накопление в кольцевой зоне магнитного поля путем резкого снижения набора энергии за один оборот.

Исключение в этом варианте устройства для группирования частиц пучка (банчера), а также использование имеющегося в наличии готового серийного магнита позволит значительно сократить суммарные затраты на реализацию предложенного варианта внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2009

Savchenko O. V.

P9-2009-161

A Storage Accelerator for the External Injection into the JINR Phasotron

A new method of the external injection into the JINR Phasotron on the basis of the storage accelerator, which combines a usual regime of the  $H^-$ -ion acceleration within the central region of the formed magnetic field and their further accumulation inside of the annular zone of the magnetic field by means of the sharp reduction of the increment of the energy for one revolution, is proposed and considered.

Elimination in that version of the equipment for grouping of the particles of the beam (of the buncher) and using the ready serial magnet will result in a substantial reduction of the expenditure for realization of the proposed method of the external injection into the JINR Phasotron.

The investigation has been performed at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2009

## ВВЕДЕНИЕ

После завершения в 1985 г. реконструкции синхроциклотрона в фазотрон с пространственной вариацией магнитного поля и проведения всех пусконаладочных работ рутинная интенсивность внутреннего и выведенного протонного пучка фазотрона оказалась на порядок меньшей, чем это было предусмотрено первоначальным проектом реконструкции ускорителя (5 и 2,5 мкА вместо 50 и 25 мкА) [1, 2]. В процессе наладки фазотрона было выяснено, что столь значительное отклонение от проектных параметров определяется прежде всего процессами, происходящими в центральной зоне фазотрона в течение первого фазового колебания, где доминирующим ограничением является слабость вертикальной фокусировки, и что после прохождения радиуса 30–50 см потери пучка при дальнейшем ускорении практически отсутствуют [3]. Такой вывод о недостаточной величине вертикальной фокусировки, присущей центральной зоне магнитного поля фазотрона, находит дополнительные подтверждения в том факте, что количество протонов в каждом цикле ускорения ( $\sim 10^{11}$ ) на реконструированном фазотроне оказалось в 3 раза меньше, чем в классическом синхроциклотроне на энергию 1 ГэВ в Гатчине (соответственно  $\sim 3 \cdot 10^{11}$  частиц) при меньшей в несколько раз амплитуде ускоряющего напряжения [4].

В результате полученный после реконструкции фазотрона уровень интенсивности протонного пучка, а также всех вторичных пучков значительно ограничил программу физических и прикладных исследований на этом ускорителе, изначально нацеленных на его проектные параметры, и привел к такой ситуации, что Лаборатория ядерных проблем ОИЯИ оказалась единственной среди лабораторий института, не обладающей конкурентоспособной базовой установкой.

Для выхода из создавшегося положения автором этой статьи еще в 1990 г. было выдвинуто предложение [5] и сделаны первые оценки [6] возможности осуществления внешней инжекции пучка на радиус 30–50 см от расположенного рядом с фазотроном линейного ускорителя  $H^-$ -ионов на энергию 6–15 МэВ, частотой повторения циклов ускорения 250 Гц, длительностью импульса 10–20 мкс и током в импульсе  $\sim 50$  мА. Инжекция пучка на выбранный радиус осуществляется в два этапа. Сначала  $H^-$  с эффективностью около 60% перезаряжаются в  $H^0$  на газовой мишени толщиной

1,0–2,0 мкг/см<sup>2</sup>, расположенной вне магнитного поля фазотрона, а затем на тонкой фольге толщиной 15–20 мкг/см<sup>2</sup>, установленной на выбранном радиусе, происходит перезарядка Н<sup>0</sup> в Н<sup>+</sup> с эффективностью 100 %.

Такая схема внешней инжекции позволяет, ничего не меняя и не нарушая в режиме работы фазотрона, обойти ограничения на предельную интенсивность в центральной зоне ускорителя и существенно, примерно на порядок, повысить средний ток внутреннего пучка фазотрона до величины, близкой к 50 мкА, которая и была предусмотрена проектом установки «Ф» [1].

Однако стоимость реализации этого варианта внешней инжекции составила бы около 10 млн долларов США, что находилось далеко за пределами финансовых возможностей ОИЯИ.

В последующее время автором этой статьи были предложены [7] еще несколько вариантов внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ на основе использования в качестве ускорителя-инжектора сильноточного секторного циклотрона и изохронного циклотрона, разработанных в отделе новых ускорителей (ОНУ) ЛЯП ОИЯИ, стоимость реализации которых была бы значительно меньше стоимости первоначального варианта внешней инжекции, однако существующие финансовые ограничения в ОИЯИ все еще не позволяют реализовать даже такие варианты внешней инжекции в фазотрон.

Целью настоящей работы является предложение и рассмотрение еще одного варианта внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ, который может оказаться наименее затратным и который можно будет реализовать за счет только собственных ресурсов Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ в рамках ее текущей деятельности.

## **1. ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПО НОВОМУ ВАРИАНТУ ВНЕШНЕЙ ИНЖЕКЦИИ В ФАЗОТРОН ОИЯИ**

Принципиальная схема ускорителя для нового варианта внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ показана на рис. 1. Основная особенность этого варианта инжекции состоит в том, что в ускорителе-инжекторе (изохронном циклотроне на энергию 16 МэВ) объединены функции ускорения и накопления Н<sup>-</sup>-ионов. Это достигается разделением дуантной системы ускорителя на три части: обычного полукруглого дуанта, перекрывающего половину полюса магнита, промежуточного постоянно заземленного дуанта с полукруговым центральным выступом и полукольцевого дуанта, питаемого от дополнительного высокочастотного генератора, работающего по заданной временной схеме с возможностью сдвига фазы на 180° или быстрого отключения высокочастотного напряжения за время около 1 мкс.

В этом ускорителе-накопителе, имеющем на конечном радиусе среднее магнитное поле 1,2 Тл, Н<sup>-</sup>-ионы непрерывно ускоряются из центра сначала

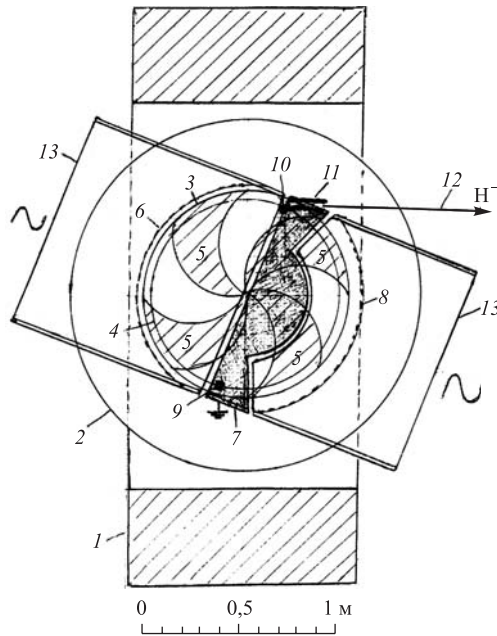


Рис. 1. Принципиальная схема ускорителя-накопителя для внешней инъекции в фазотрон ОИЯИ на базе серийного магнита СП-57: 1 — боковое ярмо магнита; 2 — катушка возбуждения магнита; 3 — полюс магнита; 4 — конечная орбита ускоренного пучка  $H^-$ -ионов; 5 — спиральные шиммы; 6 — основной полукруговой дуант; 7 — промежуточный заземленный дуант; 8 — дополнительный полукольцевой дуант; 9 — возбудитель; 10 — регенератор; 11 — электростатический дефлектор; 12 — направление выведенного пучка  $H^-$ -ионов; 13 — резонансные линии

до промежуточной энергии  $\approx 8$  МэВ на радиусе 34 см при амплитуде ускоряющего напряжения 30–50 кВ и частоте  $\approx 18$  МГц, а затем попадают под действие тормозящего высокочастотного напряжения такой же частоты на полукольцевом дуанте и при такой выбранной амплитуде, что приращение энергии  $H^-$ -иона за один оборот уменьшается примерно на два порядка (до  $\sim 100$  эВ), в результате чего  $H^-$ -ионы медленно, за время  $\approx 4$  мс, соответствующее периоду модуляции фазотрона, доускоряются до конечной энергии 16 МэВ на радиусе 48 см. По достижению конечной энергии полукольцевой дуант заземляется электронным образом или фаза подаваемого на него высокочастотного напряжения быстро, за время  $\approx 1$  мкс, изменяется на  $180^\circ$ .

Накопленные в кольцевой области  $H^-$ -ионы под действием уже суммарного ускоряющего напряжения  $\approx 50$  кВ за время  $\approx 10$  мкс (время ускорения от энергии 8 до 16 МэВ) выводятся из ускорителя и направляются, как и в ранее рассмотренных вариантах внешней инъекции [7], сначала на газовую мишень для перезарядки  $H^-$  в  $H^0$ , а затем на тонкой углеродной мишени, расположенной в камере фазотрона на радиусе 48 см, происходит перезарядка  $H^0$  в  $H^+$  с вероятностью, близкой к 100 %.

Далее на этом радиусе протоны захватываются в процесс ускорения пучка на фазотроне, постепенно заполняя сепаратрису, которая характеризуется косинусом равновесной фазы, равным  $\approx 0,25$ , полупериодом фазовых ко-

лебаний около 30 мкс и разбросом по энергии  $\approx \pm 4$  МэВ, приводящим к радиальным размерам пучка  $\approx \pm 6$  см на радиусе  $\approx 50$  см.

За время инжекции  $\approx 10$  мкс равновесная энергия протонного пучка в фазотроне увеличивается всего на 2,7 МэВ при амплитуде ускоряющего напряжения 30 кВ, и это означает, что инжектируемые протоны лишь частично заполняют сепаратрису протонного пучка фазотрона. Это гарантирует при равенстве частот обращения в ускорителе-инжекторе и фазотроне почти 100 % захват инжектируемых частиц в процесс дальнейшего ускорения протонного пучка в фазотроне.

В качестве ускорителя  $H^-$ -ионов наиболее экономично может быть использован изохронный циклотрон У-115 Т на энергию протонов 20 МэВ, разработанный и созданный в ОНУ ЛЯП ОИЯИ [8] на базе серийного магнита СП-57, один из экземпляров которого еще имеется в наличии. Такой изохронный циклотрон рассчитан на ток внутреннего пучка до 500 мкА, что с большим запасом обеспечивает накопление за время  $\approx 4$  мс свыше  $5 \cdot 10^{12}$   $H^-$ -ионов, необходимых для внешней инжекции за один цикл ускорения фазотрона с учетом потерь при ускорении и выводе пучка из ускорителя-накопителя, а также эффективности перезарядки  $H^-$  в  $H^0$  на газовой мишени.

Для согласования частоты вращения и временной микроструктуры пучка фазотрона и параметров пучка внешнего инжектора среднюю магнитную индукцию на конечном радиусе 48 см в изохронном циклотроне У-115 Т необходимо понизить с 1,35 до 1,2 Тл, что соответствует энергии  $H^-$ -ионов на этом радиусе около 16 МэВ. В этом случае отпадает необходимость в дополнительном устройстве (банчере) для группировки частиц пучка по времени от внешнего инжектора.

Два главных фактора могут ограничивать время накопления пучка  $H^-$ -ионов в кольцевой зоне ускорителя. Это электрическая диссоциация  $H^-$ -ионов в магнитном поле ускорителя-накопителя и их взаимодействие с молекулами остаточного газа в вакуумной камере.

Как было показано в работе [7] для третьего варианта внешней инжекции в фазотрон, оба эти фактора при магнитном поле 1,2 Тл и вакууме  $10^{-7}$  Торр не оказывают заметного влияния на конечное число накопленных  $H^-$ -ионов за время  $\approx 4$  мс.

Для обеспечения такого вакуума возможно использование только внешнего источника  $H^-$ -ионов с аксиальным вводом пучка и последующим переводом его в медианную плоскость ускорителя с помощью спирального инфлектора, разработанного в ОНУ ЛЯП ОИЯИ [9].

Из-за эффектов пространственного заряда в кольцевой зоне накопителя  $H^-$ -ионов жесткость магнитного поля изохронного циклотрона У-115 Т может оказаться недостаточной для обеспечения поперечной фокусировки. Необходимое усиление жесткости в кольцевой зоне ускорителя-накопителя мож-

но будет осуществлено увеличением наклона спиральных шимм в интервале радиусов 34–48 см этой зоны.

Основные параметры ускорителя-накопителя для внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ суммированы в таблице.

Наименование параметра	Величина
Энергия выведенного пучка $H^-$ -ионов, МэВ	16
Интенсивность $H^-$ -ионов в центральной зоне, мкА	200–500
Число накопленных $H^-$ -ионов за время $\approx 4$ мс	$5 \cdot 10^{12}$
Среднее магнитное поле на радиусе 48 см, Тл	1,2
Частота ускоряющего напряжения, МГц	18
Внутренний радиус кольцевого дуанта, см	34
Энергия $H^-$ -ионов на радиусе 34 см, МэВ	8
Амплитуда ускоряющего напряжения на основном и кольцевом дуантах, кВ	30–50
Суммарное приращение энергии за один оборот в кольцевой зоне, эВ	$\approx 100$
Вес ускорителя-накопителя, т	$\approx 50$
Потребляемая мощность, кВт	$\approx 100$

Приведенные в этом разделе и таблице значения параметров ускорителя-накопителя носят приближенный, оценочный характер, и только детальные расчеты на ЭВМ динамики пучка в инжекторе и при захвате пучка в процесс ускорения на фазотроне позволят определить все эти параметры с необходимой точностью и сделать окончательное заключение о принципиальной осуществимости такого варианта внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ.

## 2. ВОЗМОЖНЫЙ ЭКОНОМИЧНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ФАЗОТРОНА ОИЯИ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ВНЕШНЕЙ ИНЖЕКЦИИ

Преимущества повышения интенсивности внутреннего пучка фазотрона до 50 мкА или более за счет внешней инжекции при существующей эффективности вывода 50–60% с помощью железно-токового канала не могут быть реализованы из-за уровня радиационных ограничений при эксплуатации фазотрона (в камере не должно теряться более 3 мкА внутреннего пучка).

Разработанные в ОНУ ЛЯП ОИЯИ электростатические системы вывода протонного пучка из фазотрона [10, 11] позволяют повысить коэффициент

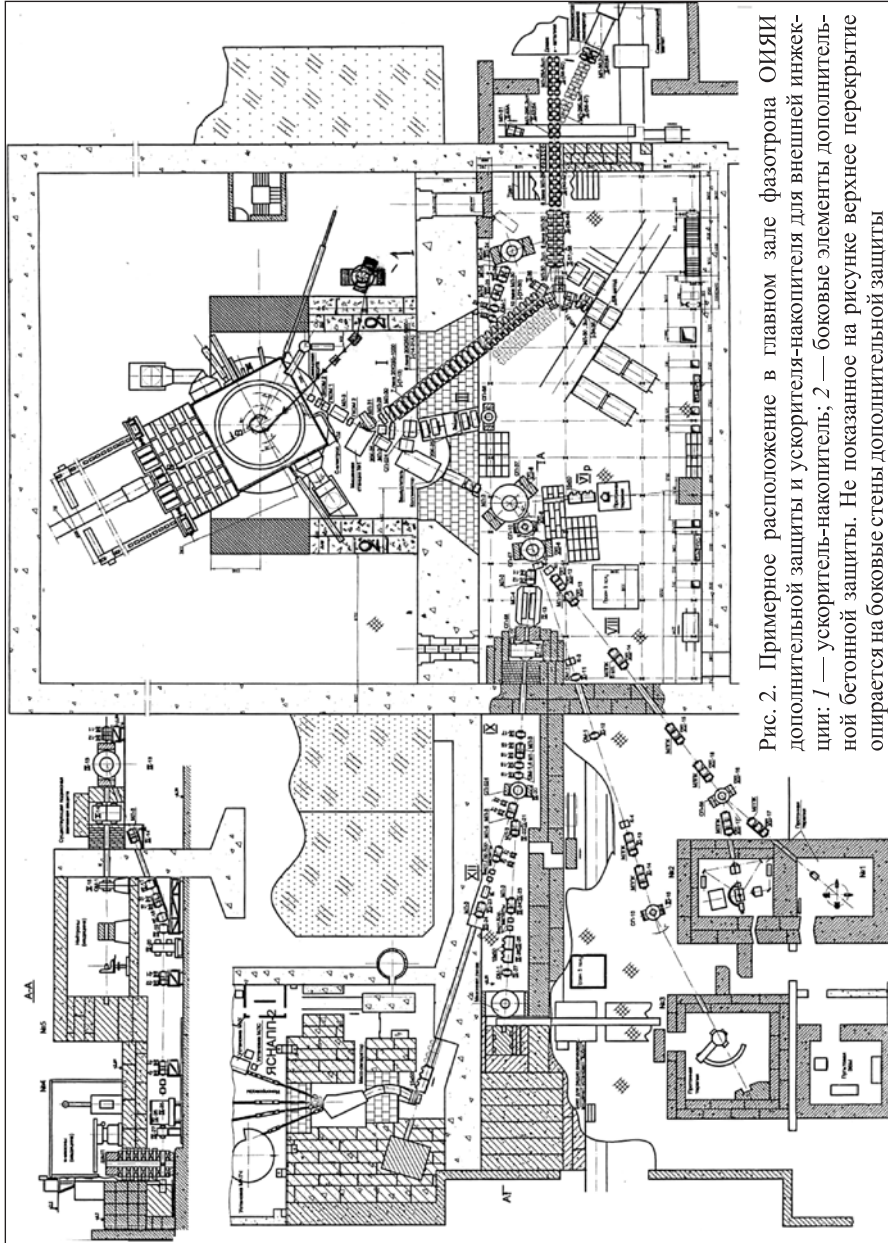


Рис. 2. Примерное расположение в главном зале фазотрона ОИЯИ дополнительной защиты и ускорителя-накопителя для внешней инжекции: 1 — ускоритель-накопитель; 2 — боковые элементы дополнительной бетонной защиты. Не показанное на рисунке верхнее перекрытие опирается на боковые стены дополнительной защиты



вывода до 80–90 %. Однако электростатические дефлекторы в этих системах вывода пучка должны устанавливаться внутри дуанта фазотрона, что потребует значительных дополнительных затрат на изготовление нового или доработку старого дуанта, на улучшение вакуума в камере ускорителя и усложнит эксплуатацию фазотрона. В целом такая модернизация системы вывода пучка приведет к существенному увеличению суммарной стоимости внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ.

Можно предложить другой, более простой и дешевый способ преодоления радиационных ограничений, который возможно осуществить при выполнении двух условий. Во-первых, путем изменения режима работы фазотрона таким образом, чтобы при увеличенной интенсивности внутреннего пучка строго соблюдалось не превышение допустимой интегральной дозы по наведенной активности в камере ускорителя за неделю, месяц или год. Во-вторых, путем сооружения дополнительной локальной защиты с толщиной стенок около 2 м обычного бетона в промежутке между камерой фазотрона и четырехметровой стеной вокруг тракта Т, которая позволит снизить мгновенную интенсивность рассеянной радиации во всех контрольных точках до допустимого уровня при максимально увеличенной интенсивности выведенного пучка. Примерное расположение и размеры такой защиты, а также ускорителя-накопителя для внешней инжекции в фазотрон показаны на рис. 2.

Если раньше допустимая интегральная доза в камере фазотрона по наведенной активности достигалась при 4–5 тыс. часов работы фазотрона за один год при средних потерях в камере не более 3 мкА внутреннего пучка, то при увеличенной до 3–5 раз интенсивности внутреннего пучка после реализации внешней инжекции фазотрону будет достаточно работать всего 1–2 тыс. часов в год для получения такого же уровня статистической точности в физических и прикладных исследованиях, проводимых на мезонных пучках фазотрона. При этом из-за общего сокращения времени работы фазотрона и появления возможности параллельной работы на мезонных пучках и медицинском пучке при увеличенной интенсивности выведенного пучка фазотрона возникает большая экономия средств за счет снижения в несколько раз потребляемой фазотроном электроэнергии, которые могут быть направлены на совершенствование фазотрона и трактов его пучков, как, например, на получение интенсивных сепарированных пучков поверхностных мюонов на канале № 2 по схеме, предложенной и рассмотренной в [12].

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Предложен и рассмотрен вариант внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ на основе использования ускорителя-накопителя (видоизмененного изохрон-

ного циклотрона), объединяющего в себе обычный режим ускорения  $H^-$ -ионов в центральной области сформированного магнитного поля и их дальнейшее накопление в его кольцевой зоне за счет резкого (на два порядка) снижения набора энергии за один оборот. В качестве основы конструкции ускорителя-накопителя предлагается использовать, с рядом изменений и дополнений, разработанный в ОНУ ЛЯП ОИЯИ изохронный циклотрон У-115 Т на базе серийного магнита СП-57.

Возможность объединения в одном ускорителе режимов ускорения и накопления достигается путем дополнения ускоряющей системы промежуточным заземленным полукруговым дуантом и полукольцевым дуантом, питаемым от отдельного высокочастотного генератора, а также усилением магнитной жесткости в кольцевой области для противодействия увеличенному пространственному заряду. Снижение магнитной индукции в ускорителе-накопителе на конечном радиусе до 1,2 Тл позволит уравнять частоты ускорителя-накопителя и фазотрона на радиусе инжекции около 48 см и тем самым исключить из схемы инжекции устройство для группирования частиц инжектируемого пучка (банчер). С учетом опыта разработок ОНУ ЛЯП ОИЯИ по изохронным циклотронам и наличия готового магнита СП-57 можно значительно (до  $\sim 0,5$  млн долларов США) уменьшить суммарные затраты на реализацию предложенной схемы внешней инжекции в фазотрон и осуществить ее только за счет внутренних ресурсов ЛЯП ОИЯИ, в том числе за счет сэкономленной электроэнергии во время остановки фазотрона на время монтажа и наладки всей системы инжекции в фазотрон ОИЯИ, а также сокращения времени работы в будущем при увеличенной в несколько раз интенсивности его пучков.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Глазов А. А. и др. Препринт ОИЯИ 9-3951. Дубна, 1968.
2. Фазотрон Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ и его пучки. ОИЯИ, 9-92-232. Дубна, 1992.
3. Ворожцов С. Б. и др. // Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, ОИЯИ, 1985. Т. 1. С. 324.
4. Abrosimov N. K. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 1985. V. 242. P. 121–133.
5. Савченко О. В. // Совещание по программе экспериментов на фазотроне ОИЯИ. Дубна, 1990. С. 17.
6. Савченко О. В. ОИЯИ, Б1,9-90-72. Дубна, 1990.
7. Савченко О. В. Сообщение ОИЯИ Р9-2008-22. Дубна, 2008.

8. Аленицкий Ю. Г. и др. // Труды XIII Совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 13–15 октября 1992 г. Дубна, 1993. Т. 2. С. 313.
9. Аленицкий Ю. Г. и др. // Там же. Т. 1. С. 348.
10. Onishchenko L. M. et al. // Proc. of XIX RUPAC, Dubna, October 4–8, 2004. P. 138.
11. Василенко А. Т. и др. Сообщение ОИЯИ Р9-8921. Дубна, 1975.
12. Dmitrievsky V. P. et al. // Proc. of EPAC-90, Nice, V. 1. P. 1226.
13. Андреев Е. М. и др. Сообщение ОИЯИ Р9-2005-9. Дубна, 2005.

Получено 28 октября 2009 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 25.02.2010.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,9. Тираж 270 экз. Заказ № 56904.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)