

# ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

А. В. Колмогорова

На тему: «**Инжектор пучка атомов водорода высокой яркости для источника поляризованных ионов**» по специальности: 01.04.20 –Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертация А. В Колмогорова связана с разработкой и исследованием инжектора атомов водорода высокой яркости для источника поляризованных ионов с оптической накачкой OPPIS (OPPIS-Optically Pumped Polarized Ion Source). Автором представлены в диссертации следующие результаты работы:

- описан выбор и оптимизация параметров инжектора быстрых атомов;
- представлена конструкция разработанного инжектора и результаты его исследования;
- рассмотрено использование созданного инжектора в источнике поляризованных ионов и представлены полученные результаты;
- описано использование разработанного инжектора для генерации неполяризованных отрицательных ионов водорода известным методом перезарядки пучка протонов низкой энергии на водородной и натриевой мишнях.

Разработка инжектора базировалась на опыте ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН, где была создана серия диагностических инжекторов ДИНА для термоядерных исследовательских установок с близкими к требуемым для данного проекта параметрами.

## Актуальность темы

В данной работе описан инжектор пучка атомов водорода, который используется в источнике поляризованных протонов с оптической накачкой, созданного в Брукхэйвенской Национальной Лаборатории (БНЛ, США). В БНЛ функционирует ускорительно-накопительный комплекс RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider), в котором организуются столкновения встречных ускоренных пучков тяжелых ионов, а также, впервые в ускорительной физике, поляризованных протонов. В БНЛ с 2003 года выполнялись исследования с поляризованными протонами. Достигние высокой светимости сталкивающихся пучков в RHIC стало возможным, в частности, благодаря высокой интенсивности источника поляризованных протонов с оптической накачкой.

Дальнейшее повышение интенсивности и поляризации пучка протонов из источника ожидалось при использовании схемы OPPIS с внешним инжектором атомов водорода высокой яркости. Поэтому тема диссертации А. В. Колмогорова является актуальной.

**Степень обоснованности и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации,**

Для достижения цели проекта требовалось создать инжектор нейтральных атомов с уникальными характеристиками: высокой интенсивностью (несколько эквивалентных ампер тока пучка), малой угловой расходимостью ( $\sim 10$  мрад) при низкой энергии атомов в диапазоне 6-10 кэВ. При разработке инжектора автор использует известные научные методы обоснования результатов. Результаты работы докладывались автором на международных конференциях и семинарах и представлены в 7 опубликованных работах. Расчетные результаты получены с использованием апробированных моделей и программных средств.

В результате описанных в диссертации исследований создан инжектор атомов водорода высокой яркости. Получен пучок атомов водорода с током эквивалентным (3-4) А при энергии 6-10 кэВ и с расходимостью около 10 мрад. Разработанный инжектор был использован в OPPIS. В результате выполненных исследований из OPPIS получен пучок поляризованных отрицательных ионов водорода с током более 1 мА и поляризацией до 85%, что превышает достигнутые ранее параметры поляризованного пучка в схеме с ЭЦР источником протонов в сильном магнитном поле. Улучшение параметров OPPIS было одним из важных факторов, которые привели к повышению светимости сталкивающихся пучков поляризованных протонов в RHIC в два раза.

При перезарядке интенсивного пучка атомов водорода на натриевой струйной мишени получен пучок отрицательных неполяризованных ионов водорода с током 34 мА, энергией 8 кэВ, длительностью 0.5 мс.

Выводы, сделанные в диссертации, а также содержание автореферата, соответствуют содержанию диссертации.

Научно-технические решения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, являются обоснованными и достоверными. Правильность и достоверность принятых решений подтверждена достигнутыми параметрами инжектора пучка быстрых атомов.

## **Научная новизна исследования**

Научная новизна заключается в том, что схема OPPIS с внешним инжектором атомов водорода высокой яркости впервые была использована на действующем ускорителе и в том, что в результате проведенных исследований существенно улучшены параметры OPPIS. Также впервые обнаружена и исследована фокусировка полученного пучка отрицательных неполяризованных ионов водорода в компенсированном водородном пучке после прохождения перезарядной мишени.

## **Замечания к тексту диссертации**

1. Для получения пучка атомов водорода с малой расходимостью в данном инжекторе требуется иметь практически полную (~0.9999) компенсацию пространственного заряда пучка ионов водорода в области между ионно-оптической системой (ИОС) источника ионов и перезарядной водородной мишенью, а также в области между гелиевой и рубидиевой мишениями OPPIS.

В диссертации автором при выборе параметров источника атомов в главе 1 не анализируются условия, при которых возможна столь высокая степень компенсации пространственного заряда пучка. При расчете фокусного расстояния системы формирования величина компенсации пространственного заряда пучка не учитывается. Но в главе 2 различие результатов измерений с расчетами объясняется возможным наличием поперечных электрических полей в ионном пучке из-за неполной компенсации пространственного заряда, хотя здесь не приводятся результатов измерений степени компенсации пространственного заряда.

Однако в заключительной главе диссертации фокусировка отрицательных ионов водорода в пучке ионов и атомов после перезарядной мишени объясняется наличием электрического поля пространственного заряда сопутствующего пучка протонов из-за неполной компенсации его пространственного заряда, что подтверждается измерением пространственного заряда в пучке атомов и ионов водорода после перезарядной мишени с использованием Ленгмюровского зонда.

Представляется, что рассмотрение влияния пространственного заряда ионного пучка на фокусировку интенсивного атомов водорода в диссертации должно было бы быть более полным и последовательным.

2. Инжектор быстрых атомов водорода был создан для использования в схеме OPPIS с инжекцией атомов в сильное магнитное поле. Эта схема была впервые исследована в ИЯИ РАН в группе под руководством А. Н. Зеленского [A. N. Zelenski et. al., NIM, A245, p.223,

1986]. Автор приводит во введении ссылку на обзор А. Н. Зеленского по источникам поляризованных ионов. Но представляется, что следовало бы привести ссылку на указанную оригинальную работу в главе 1 при описании схемы OPPIS с внешней инжекцией атомов (стр. 13-17, рис. 1.1).

Аналогично, при описании струйной натриевой мишени в главе 4 (стр. 77-78, рис. 4.2) следовало бы привести ссылку на оригинальную работу А. Н. Зеленского, в которой была описана разработанная им для OPPIS струйная мишень (A. Zelenski, SPIN 2000, AIP Conf. Proc. 570, p. 179, 2001).

3. На стр. 14 при описании OPPIS содержится неточное утверждение:

«В области выхода из сверхпроводящего соленоида расположена катушка корректирующего соленоида(6), создающая необходимые условия для осуществления перехода Сона, при котором спин электрона, захваченного в рубидиевой ячейке, передается протону».

Правильнее было бы (так как спин электрона не передается, и остается равным  $\frac{1}{2}$ , а изменяется спиновое состояние атома водорода):

«В области выхода из сверхпроводящего соленоида расположена катушка корректирующего соленоида(6), создающая необходимые условия для осуществления перехода Сона, в результате которого поляризация спина электронов, захваченных протонами в рубидиевой мишени, конвертируется в поляризацию протонов, возникающую затем в атомах водорода в сильном магнитном поле ионизатора OPPIS».

4. На стр. 14 в следующем предложении допущена ошибка:

«Отрицательное напряжение, приложенное к гелиевой ячейке, позволяет отделить по энергии основную компоненту пучка от атомов водорода с меньшей начальной энергией, не ионизовавшихся в ячейке». При отрицательном напряжении на ячейке основная компонента пучка (протоны, возникающие в ячейке в результате ионизации атомов водорода при столкновениях с атомами гелия) замедляется, а не ионизовавшиеся атомы выходят из ячейки без замедления. Поэтому должно быть: «Отрицательное напряжение, приложенное к гелиевой ячейке, позволяет отделить по энергии основную компоненту пучка от атомов водорода с большей энергией, не ионизовавшихся в ячейке».

5. На стр. 15 вместо «... неполяризованный пучок с энергией 38-43 кэВ.» должно быть «...неполяризованный пучок с энергией 38-42 кэВ.»

6. На стр. 17 вместо «... продемонстрирован пучок поляризованных ионов H- с током более 10 mA и 50 mA в водородном пучке» должно быть «... продемонстрирован пучок поляризованных ионов H- и H+ с током более 10 mA и 50 mA соответственно».

7. На стр. 17 вместо «Все эти факторы приводят к дальнейшему увеличению поляризации в импульсном режиме до ~90%, а интенсивность источника до 10 мА» точнее было бы «Все эти факторы создают возможность для дальнейшего увеличения поляризации в импульсном режиме до ~90%, а интенсивности источника до 10 мА».
8. На стр. 18 формулу для закона Чайлда – Ленгмюра следовало привести в системе единиц СИ.
9. На стр. 20 вместо «Отклонение пучка, прошедшего через ячейку, записывается как отношение продольного импульса к поперечному» должно быть «Угловое отклонение пучка, прошедшего через ячейку, равно (при малых углах отклонения) отношению поперечного импульса к продольному».
10. В параграфе 1.2 в диссертации вычисляется фокусное расстояние ИОС в том числе учитывается начальная поперечная скорость ионов. Следует отметить, что фокусное расстояние линзы определяется как расстояние от главной плоскости линзы до точки, в которую фокусируются частицы, падающие траектории которых параллельны оси системы. Если автору было удобнее одновременно с другими факторами учесть начальную поперечную скорость ионов, то следовало бы говорить о расстоянии до кроссовера пучка, возникающего в результате баллистической фокусировки. Учет влияния пространственного заряда (стр. 63-64) также влияет не на фокусное расстояние линзы, образованной ИОС, а на расстояние до кроссовера пучка.
11. На стр. 21, 22 в формулах (1.4), (1.5) правая часть расходится при  $U_2 \rightarrow U_1$  ( $\alpha \rightarrow 1$ ),  $\theta_{\text{нач}} \rightarrow \infty$  (1.4),  $\theta_{\text{пар}} \rightarrow \infty$  (1.5). Поэтому для выражений (1.4), (1.5) следовало бы установить пределы применимости при сделанных при их выводе допущениях.
12. На стр. 23 следующее утверждение представляется спорным: «Поскольку вблизи от источника протонного пучка расположен соленоид с напряженностью магнитного поля на оси 25-30 кГс, использование фокусирующих электростатических и магнитных элементов невозможно». Следует отметить, что использование электростатической фокусировки в данном источнике привело бы к нарушению компенсации пространственного заряда пучка и является скорее всего действительно невозможным по этой причине, а не из-за соленоида. Для магнитной фокусировки краевое поле соленоида может быть и не является большой проблемой, во всяком случае краевое поле соленоида можно было бы экранировать. Также возможно было бы использование плазменной линзы, в которой применяются одновременно магнитное и электрические поля. Так что утверждение, что магнитная фокусировка в данном случае невозможна, является слишком категоричным.

13. На стр. 33 вместо названия рисунка 1.10 «Диаграмма эмиттанса пучка, сформированного в элементарной ячейке» точнее было бы «Диаграмма поперечного фазового портрета пучка, сформированного в элементарной ячейке».
14. На стр. 54 на рис. 2.12 приведены измеренные распределения плотности тока пучка по перпендикулярным осям. Приведенные результаты показывают, что распределения плотности тока пучка по вертикали и горизонтали различаются и по величине и по пространственному положению относительно оси системы, хотя ИОС источника является аксиально-симметричной. В тексте диссертации нет обсуждения и объяснения этой асимметрии.
15. На стр. 55 вместо «Яркость пучка определяется плотностью тока пучка и его угловой расходимостью» точнее было бы «Как известно, яркость пучка частиц определяется как отношение тока пучка к его четырехмерному поперечному фазовому объему». Учитывая определение яркости пучка, очевидно, что при фиксированном начальном токе пучка и поперечном эмиттансе, яркость не зависит от фокусного расстояния линзы, образованной ИОС, и от локальной расходимости ионного или атомарного пучка, в отличие от того, что утверждается в диссертации.
16. Подпись к рис. 2.17, стр. 63: вместо «...зеленый пунктир и точки» должно быть «...оранжевый пунктир и точки».
17. На стр. 64 яркость пучка атомов определяется через характерные величины для радиуса пучка и его угловой расходимости. Следовало указать, что эти характеристики пучка должны быть взяты для кроссовера пучка. Учитывая распределения радиальной плотности тока пучка и расходимости, следовало бы указать, к какой части полного тока пучка атомов относится вычисленная яркость, а также, поскольку фазовый портрет пучка не измерялся, что приведенная величина яркости является приближенной оценкой.
18. На стр. 75 вместо «Источник поставлял пучки для коллайдера RHIC с количеством протонов  $\sim 2 \cdot 10^{11}$ » точнее было бы «Источник поставлял пучки для коллайдера RHIC с количеством протонов  $\sim 2 \cdot 10^{11}$  за импульс».
19. На стр. 86 утверждается, что «...средняя угловая расходимость частиц, прошедших через диафрагму диаметром 2 см, не превышает 10 мрад, таким образом величина эмиттанса пучка ионов  $H^-$  не превышает  $0.2\pi$  мм·мрад».
- Здесь имеется ввиду нормализованный эмиттанс (в явном виде это указывается в Заключении на стр. 95). Но неясно, к какой части пучка ионов  $H^-$  относится указанная величина эмиттанса, если методом Монте - Карло определена средняя расходимость пучка. Более того, если мы примем, что расходимость пучка равна 10 мрад, размер пучка

равным радиусу диафрагмы – 10 мм, то для энергии ионов 8 кэВ (стр. 84) получим величину нормализованного эмиттанса  $\sim 0.4\pi$  мм мрад, то есть в два раза больше, чем указано в диссертации. Учитывая, что эмиттанс пучка ионов  $H^-$  не измерялся, указанное в диссертации значение нормализованного эмиттанса пучка ионов  $H^-$  с током 34 мА следует рассматривать как очень приближенную (с точностью до коэффициента 2-3) оценку.

20. На стр. 89 написано, что «С помощью цилиндра Фарадея измерена величина ионного тока пучка, отклоненного поворотным магнитом (рисунок 4.13)». Во-первых, схема экспериментального стенда показана на рис. 4.12, а не 4.13. Во-вторых, в тексте не говорится о подавлении вторичных электронов, которые оказывают при данных энергиях существенное влияние на величину суммарного тока, регистрируемого цилиндром Фарадея. Из рисунка 4.12 и подписи к нему также неясно, осуществлялось подавление вторичных электронов или нет.

21. На стр. 91 утверждается, что «Значительная величина тока (на зонд Ленгмюра – А. Б.) при отрицательных напряжениях связана с вторичной эмиссией электронов быстрыми водородными частицами». Далее в диссертации не анализируется, как этот процесс влияет на измерения распределения потенциала в синтезированном пучке и к какой погрешности приводит. Это делает измерения потенциала пучка оценочными с неясной погрешностью измерений.

22. На стр. 92 при описании результатов моделирования транспортировки ионов в синтезированном пучке допущены ошибки. В тексте диссертации написано: «Как видно из диаграммы (Рис. 4.15 – А. Б.) отношение плотности ионов  $H^-$  к плотности протонов составляет почти 4 раза, при этом отношение плотностей токов этих фракций вблизи эмиттера составляет 5. Таким образом, результаты моделирования хорошо согласуются с измерениями, полученными в эксперименте». Исходя из предыдущего текста параграфа 4.5 и из данных, приведенных на рис. 4.15, следовало, видимо, написать: «Как видно из данных рис. 4.15, отношение плотности тока протонов к плотности тока ионов  $H^-$  на оси пучка равно  $\sim 1.4$  при этом отношение плотностей токов этих фракций вблизи эмиттера составляет 5. Таким образом, результаты моделирования хорошо согласуются с измерениями, полученными в эксперименте».

Следует отметить, что, несмотря на значительное число замечаний к тексту диссертации, допущенные автором опечатки и ошибки не повлияли на основное содержание работы и на сделанные выводы и заключения.

## Заключение

В диссертационной работе А. В. Колмогорова представлены результаты разработки инжектора пучка атомов водорода высокой яркости, использование которого привело к повышению интенсивности источника поляризованных ионов с оптической накачкой, что имеет важное значение для развития поляризационных исследований в ядерной физике и физике высоких энергий. Таким образом, диссертация А. В. Колмогорова является научно-квалификационной работой, соответствующей требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации. А. В. Колмогоров заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника».

Официальный оппонент

Кандидат физико-математических наук

  
Белов Александр Степанович

Дата: 21.08.2018

Адрес: 108840, Россия, г. Троицк, ул. Физическая, вл. 27

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук

Телефон: 8(915)088-90-24, Тел. 8(495)850-42-01 (Троицк)

Эл. Почта: [belov@inr.ru](mailto:belov@inr.ru)

Место работы: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук

Должность: Заведующий лабораторией инжекторов и ионных источников

Подпись официального оппонента Белова А. С. 

Зам. Директора ИЯИ РАН

Д.Ф.-м.н. А. В. Фещенко

