

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

## Перезарядная инжекция в ускорители и накопители

В.Г. Дудников

*Описана разработка перезарядной инжекции в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера (ИЯФ) СО РАН, освоение перезарядной инжекции в мире, обнаружение и объяснение электрон-протонной неустойчивости. Рассмотрено получение циркулирующего протонного пучка с интенсивностью на порядок выше предела по пространственному заряду. Обсуждаются проблемы устойчивости обдиорочной фольги при инжекции интенсивных пучков и лазерная ионизация ускоренных атомов.*

**Ключевые слова:** перезарядная инжекция, накопитель, ВЧ-поле, индукционное ускорение, компенсация пространственного заряда, электрон-протонная неустойчивость

PACS numbers: 29.20.D –, 29.27. –а

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2019.02.038528>

### Содержание

1. Введение (433).
2. Исследования перезарядной инжекции в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН (434).
3. Освоение перезарядной инжекции в мире (437).
4. Инженерно-физические проблемы реализации перезарядной инжекции (438).
5. Заключение (439).

Список литературы (439).

### 1. Введение

Частицы, входящие в стационарное магнитное поле ускорителя из области без магнитного поля, движутся по "пролётным" инфинитным траекториям, пересекающим область с магнитным полем и выходящим из него. Частицы, необратимо захваченные в магнитное поле ускорителя, движутся по квазипериодическим финитным траекториям. Частицы, начинаяющие движение по финитным траекториям от инжектора, находящегося на этой траектории, через несколько периодов снова подходят к инжектору и, если он недостаточно "прозрачен", погибают. Для необратимого преобразования пролётных траекторий в захваченные и для отвода финитных траекторий от непрозрачного инжектора приходится использовать нестационарные воздействия на захватываемые частицы: изменять магнитное поле, воздействовать на частицы дополнительными электрическими и

магнитными полями. Обычно эти воздействия не избирательны. Обеспечивая необратимый захват инжектируемых частиц, они вызывают потери захваченных ранее частиц.

Отработано множество конкретных методов осуществления захвата ускоренных частиц на стационарные орбиты в ведущее магнитное поле ускорителей и накопителей: однооборотная инжекция с инфлектором, инжекция в нарастающее поле, спиральное накопление, метод фазового смещения и т.д. Эти традиционные методы инжекции позволяют довести время накопления частиц на дорожке до сотни периодов обращения. При этом вновь поступающие частицы размещаются в области фазового пространства системы, ещё не занятые предыдущими частицами, так что яркость накопленного пучка (плотность частиц в фазовом пространстве попечерных координат и импульсов) не может быть выше яркости инжектируемого пучка. Развитая инжекторная техника позволяет заполнять практически в соответствии с их фазовой ёмкостью дорожки ускорителей при низкой напряжённости магнитного поля. Однако яркости имеющихся протонных пучков недостаточно для полного заполнения дорожек ускорителей с сильным полем и накопителей, обладающих значительно более высоким пределом по пространственному заряду.

Перезарядный метод захвата частиц на дорожку ускорителя обсуждался Альваресом в 1951 г. [1]. Однако в то время уровень развития методов получения пучков отрицательных ионов был столь низок, что можно было говорить только об исследовании орбит в стационарном магнитном поле без надежды на накопление пучков с заметной интенсивностью. Позднее привлекательность перезарядной инжекции протонов в ускорители независимо отмечалась рядом авторов [2].

Целенаправленное исследование проблем, связанных с перезарядной инжекцией протонов в ускорители, было начато в 1959 г. в Институте ядерной физики (ИЯФ) СО АН СССР (в настоящее время ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН) по предложению Г.И. Будкера [3] для получе-

В.Г. Дудников. Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова 2, 630090 Новосибирск, Российская Федерация; Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, просп. Академика Лаврентьева 11, 630090 Новосибирск, Российской Федерации  
E-mail: dvg43@yahoo.com

Статья поступила 5 марта 2018 г.,  
после доработки 31 января 2019 г.

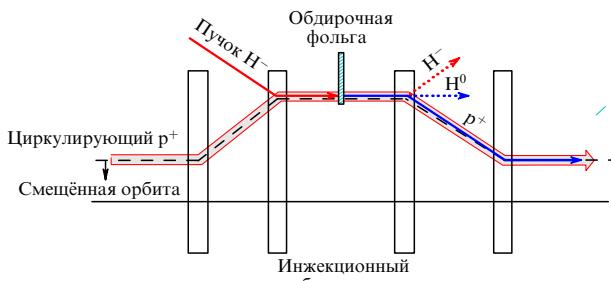


Рис. 1. Схема перезарядной инжекции [3].

ния интенсивных протонных пучков в связи с разработкой программы антипротон-протонных встречных пучков (ВАПП). Позднее эта программа была реализована в Лаборатории им. Ферми (США) при использовании разработок ИЯФ и при ведущем участии бывших сотрудников ИЯФ: перезарядная инжекция, получение антипротонов, электронное охлаждение [4]. Поскольку речь шла о накоплении пучков с предельной интенсивностью, а рекордная интенсивность полученных к тому времени пучков ионов  $H^-$  составляла только 70 мкА, важной частью реализуемой программы была разработка методов получения интенсивных (порядка нескольких миллиампер) пучков отрицательных ионов водорода.

Перезарядная инжекция частиц в ускорители и накопители — важное применение перезарядной технологии [5]. Схема перезарядной инжекции показана на рис. 1. Равновесная орбита смещается четырьмя магнитами, образуя бамп. Отрицательные ионы подводятся на касательную к орбите и обижаются на обтирочной фольге, проходя через неё на следующих оборотах.

Перезарядная технология позволяет реализовать инжектор, находящийся на равновесной финитной траектории, прозрачный для необратимо захваченных частиц. Таким инжектором служит преобразующая мишень (обтирочная фольга), "рождающая" протоны. Преобразуемые частицы  $H^-$ ,  $H^0$ ,  $H_2^+$ ,  $H_3^+$ , ускоренные до нужной энергии, подводятся к мишени таким образом, чтобы образовавшиеся в ней протоны (ионы) двигались по нужным равновесным траекториям. По окончании инжекции мишень можно "убрать" и тем самым полностью исключить её воздействие на движение частиц. Существенно, что при этом новые порции частиц попадают в области фазового пространства, уже заполненные захваченными частицами, так что яркость накопленного пучка может превышать яркость инжектируемого пучка на порядки. При этом удается обойти ограничения, накладываемые теоремой Лиувилля, о сохранении фазовой плотности частиц.

## 2. Исследования перезарядной инжекции в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН

Перезарядную инжекцию протонов на кольцевую дорожку накопителя удалось осуществить экспериментально в 1964 г. в ИЯФ СО АН СССР [6]. Затем удалось довести интенсивность протонного пучка, накопленного на дорожке накопителя перезарядным методом, до предела по пространственному заряду [7–9]. Схема установки ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН для изучения перезарядной инжекции показана на рис. 2. Это маленькое накопительное кольцо состоит из постоянного маг-

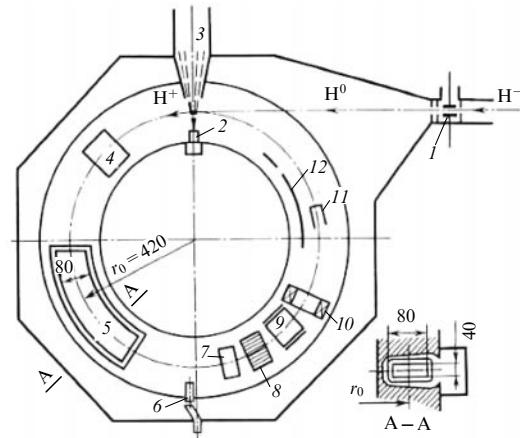


Рис. 2. Схема установки для изучения перезарядной инжекции [9]: 1 — первая обтирочная мишень, 2 — сопло сверхзвуковой струи, 3 — приемник струи, 4 — кольцевой пикап-электрод, 5 — дрейфовая трубка ВЧ-ускорения, 6 — коллиматор флуоресцентного профилометра пучка, 7 — ионизационный измеритель интенсивности пучка, 8 — ионизационный профилометр, 9 — пикап-монитор положения пучка, 10 — трансформатор тока пучка, 11 — цилиндр Фарадея, 12 — дефлектор для подавления электрон-протонной неустойчивости. Все размеры на рисунке даны в мм.

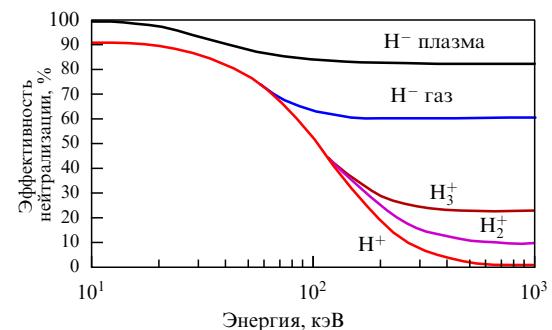
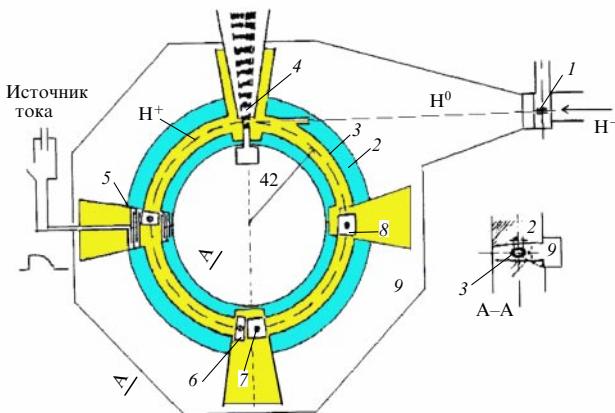


Рис. 3. Обобщённые данные о достижимой эффективности преобразования пучков ионов водорода в пучки быстрых атомов при различных энергиях полученных атомов [9].

нита циклотронного типа со слабой фокусировкой, радиус орбиты  $R = 42$  см, показатель спада поля  $n = 0,6$ , частота вертикальных бетатронных колебаний  $Q_z = (0,6)^{1/2}$ , радиальных бетатронных колебаний  $Q_r = (1 - 0,6)^{1/2}$ . В этих экспериментах к перезарядной мишени подводился пучок атомов  $H^0$  с энергией 1 МэВ, полученный конверсией на газовой мишени из ионов  $H^-$ , ускоренных до энергии 1 МэВ. Эффективность преобразования ионов  $H^-$  в  $H^0$  высокая (~ 50 %), как показано на рис. 3. В качестве обтирочной мишени для преобразования ускоренных атомов в протоны использовалась сверхзвуковая струя водорода с плотностью до  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ , включаемая на время инжекции. Радиус орбиты 42 см, апертура  $4 \times 8$  см. Ионизационные потери компенсировались высокочастотным (ВЧ) напряжением, прикладываемым к дрейфовой трубке 5. В этих экспериментах впервые использовалась ионизация остаточного газа и его флуоресценция для измерения распределения плотности тока в циркулирующем пучке протонов (ионизационный профилометр 8 и флуоресцентный профилометр 6 на рис. 2), регулярно использующиеся сейчас на всех протонных и ионных ускорителях. Эксперименты подтвердили исходные предпосылки. При накоплении с



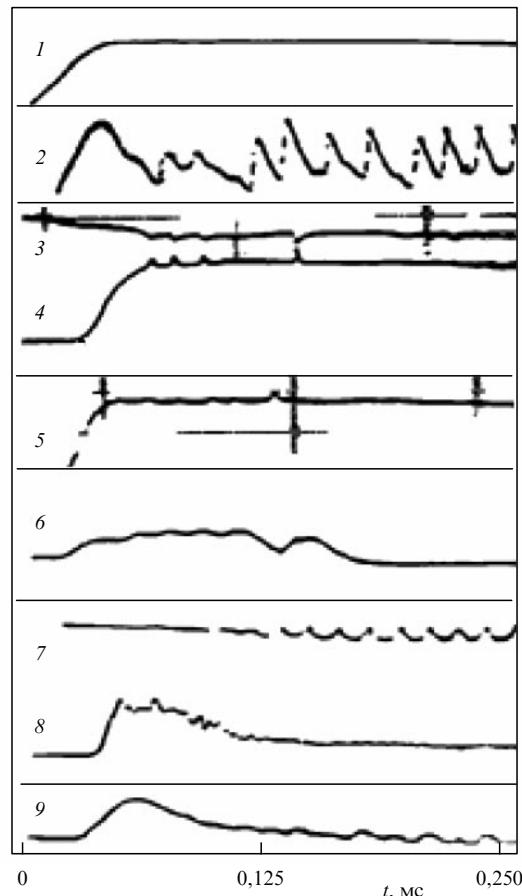
**Рис. 4.** Накопитель с бетатронной компенсацией ионизационных потерь [12]: 1 — первая обдиорочная мишень, 2 — полюс магнита, 3 — бублик, 4 — вторая обдиорочная мишень, 5 — лабиринт, 6 — кольцевой пикап, 7 — ионизационный измеритель тока, 8 — ионизационный профилометр, 9 — вакуумная камера, коллектор ионов-электронов.

высокочастотной компенсацией ионизационных потерь эффективность захвата в течение 2000 оборотов составляла 75 % в соответствии с площадью сепараторы, а при инжекции в течение 4000 оборотов эффективность снижалась только на 20 % [10]. В описанных экспериментах впервые наблюдалась и была подавлена обратной связью электрон-протонная неустойчивость (electron cloud effect), лимитирующая интенсивность пучков в мезонных фабриках и в других больших ускорителях и накопителях [11]. Накопленный пучок живет 1,5–5 мс, затем раскачиваются бетатронные колебания и пучок сбрасывается с орбиты за несколько десятков оборотов.

В дальнейшем в 1967 г. были поставлены эксперименты по получению циркулирующего протонного пучка с компенсированным пространственным зарядом и компенсацией ионизационных потерь индукционным электрическим полем. Схема накопителя с бетатронной компенсацией ионизационных потерь показана на рис. 4. Между полюсами электромагнита был установлен пустотелый медный "бублик" — полый тороидальный индуктор 3, в который инжектировался пучок ускоренных нейтралов, преобразуемый в пучок протонов на сверхзвуковой струе водорода. Индукционное поле создавалось разрядом конденсаторной батареи на разрез бублика с лабиринтом, предотвращающим проникновение импульсного магнитного поля в бублик. Подборка осциллограмм, характеризующая накопление циркулирующего протонного пучка в бублике, показана на рис. 5.

Циркулирующий пучок накапливается до равновесного уровня 1. Потенциал пучка, измеряемый кольцевым пикапом, увеличивается и затем постепенно уменьшается за счёт накопления компенсирующих электронов в течение 10 мкс. Затем потенциал резко возрастает вследствие выброса электронов и процесс накопления электронов повторяется (2). Коллекторы, заэкраннированные сеткой, регистрируют выброс электронов и ионов синхронно по всей орбите (3, 4, 5, 7). При бунчивовке пучка за счёт эффекта отрицательной массы (8) электроны не накапливаются и неустойчивость подавляется (6, 9).

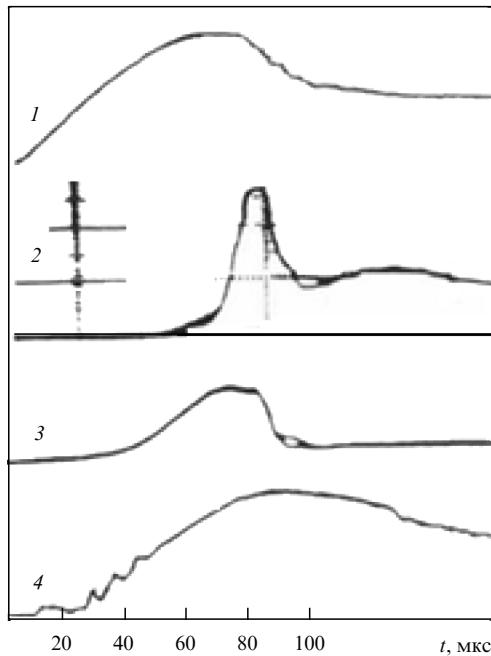
Для подавления эффекта отрицательной массы в электромагните были установлены полюсы с сильной фокусировкой. С этими полюсами было исследовано



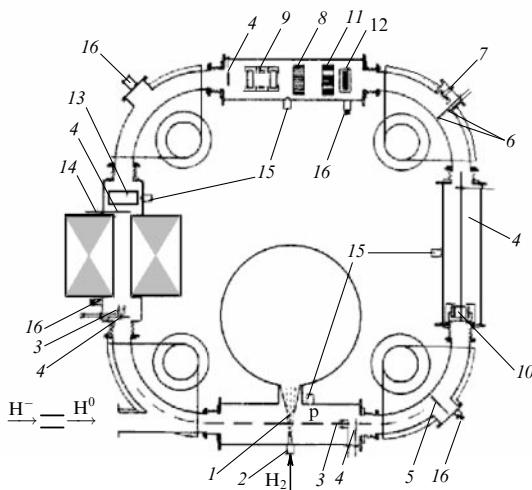
**Рис. 5.** Подборка осциллограмм, характеризующая накопление циркулирующего протонного пучка в бублике в квазибетатронном режиме [12].

накопление пучка с компенсацией ионизационных потерь индукционным полем. Сигналы накопления пучка с компенсацией ионизационных потерь индукционным полем представлены на рис. 6. Ток пучка накапливается и затем насыщается (1) с ростом сигнала с пробника горизонтальных потерь (3). При этом возрастает сигнал с пробника вертикальных потерь (2). Пикап вертикального положения пучка фиксирует рост вертикальных бетатронных колебаний (4) до сброса пучка по вертикали [12]. Эта неустойчивость, связанная с осцилляцией компенсирующих частиц в потенциальной яме пучка, хорошо описывается теорией неустойчивости, разработанной Б.В. Чирковым [13] для электронного пучка, компенсированного ионами. Позднее более детальная теория этой неустойчивости была разработана Кошмаревым и Зенкевичем [14] и Бошем [15].

Исследование коллективных эффектов в циркулирующих пучках с предельной по пространственному заряду интенсивностью в сочетании с перезарядной инжекцией позволило создать такое "супернеравновесное" образование, как циркулирующий протонный пучок, компенсированный электронным газом, с интенсивностью, почти на порядок большей предела по пространственному заряду [16, 17]. Схема накопителя для получения циркулирующего протонного пучка с интенсивностью выше предела по пространственному заряду показана на рис. 7. Это магнитная система типа "рейстрак" с большим периметром 6 м, радиусом поворотных магнитов  $R = 42$  см,

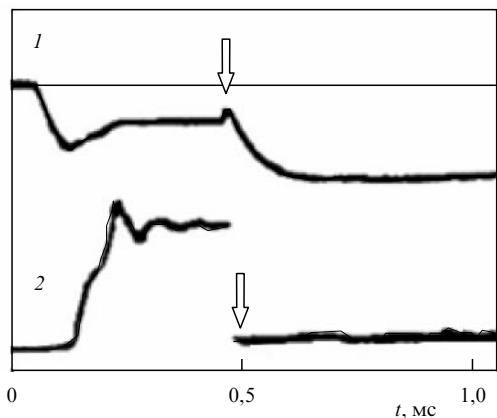


**Рис. 6.** Сигналы накопления пучка с компенсацией ионизационных потерь индукционным полем [12]: 1 — сигнал с измерителя тока, 2 — сигнал с пробника вертикальных потерь, 3 — сигнал с пробника горизонтальных потерь, 4 — сигнал вертикальных когерентных колебаний пучка.



**Рис. 7.** Накопитель для получения циркулирующего протонного пучка с интенсивностью выше предела по пространственному заряду [12]: 1 — сверхзвуковая струя — обдирочная мишень, 2 — импульсный клапан струи, 3 — коллектор пучка, 4 — кварцевый экран, 5, 6 — подвижные мишени, 7 — ионный коллектор, 8 — пояс Роговского, 9 — пикап-монитор положения пучка, 10 — электростатический пикап квадрупольных колебаний пучка, 11 — электромагнитный датчик поперечных колебаний пучка, 12 — датчик вертикальных потерь пучка, 13 — измеритель вторичных заряженных частиц в пучке, 14 — индукционный сердечник, 15 — импульсный напуск газа, 16 — стационарный напуск газа.

прямолинейными промежутками по 106 см и непрерывным протонным пучком. Пучок тоже был подвержен электрон-протонной неустойчивости с порогом  $1,2 \times 10^{10}$  протонов, которая была подавлена (самостабилизировалась) увеличением тока инъекции и напуском газа. Существование "острова стабильности" при

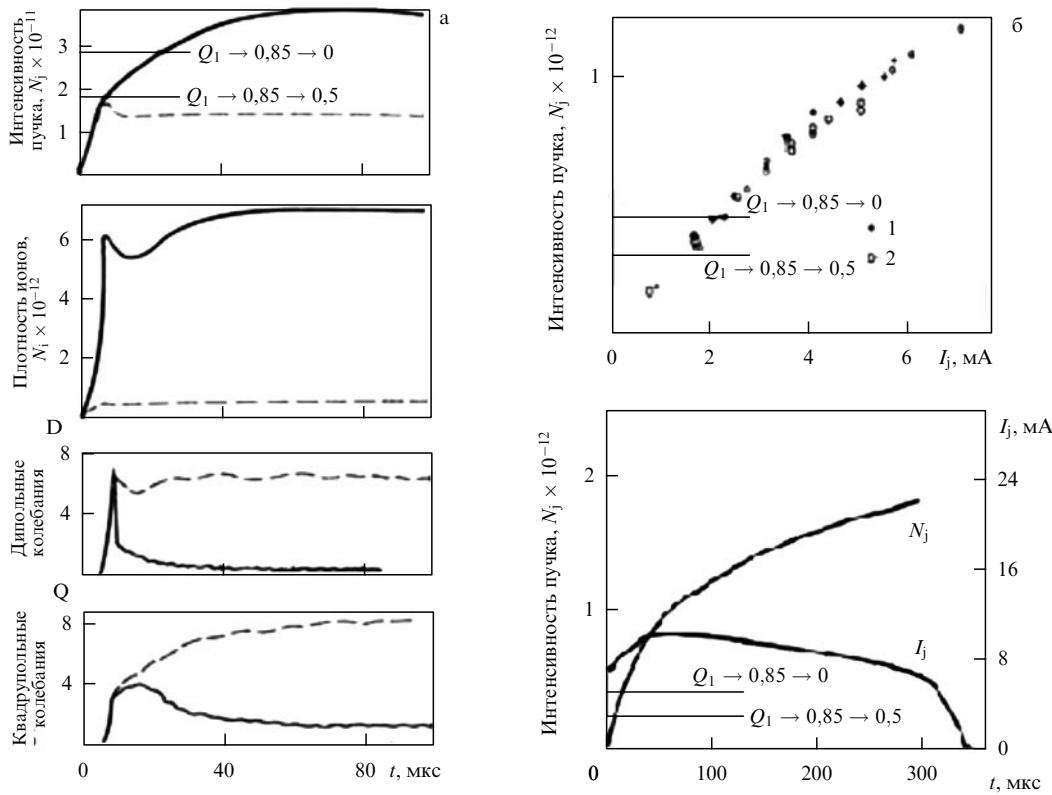


**Рис. 8.** Осциллограммы первого наблюдения накопления пучка с интенсивностью, превышающей предел по пространственному заряду [12]: 1 — интенсивность накопленного пучка, 2 — сигнал датчика вертикального положения пучка; стрелкой указан момент выключения вытягивающего напряжения.

большой плотности тока предсказывалось теорией Чиркова [13] и Босха [15].

Осциллограммы первого наблюдения накопления пучка с интенсивностью, превышающей предел по пространственному заряду, показаны на рис. 8. Пучок накапливался до предела по пространственному заряду с включённым отсосом электронов по всей орбите (1). При этом развивается неустойчивость Херварда (H.G. Herward), связанная с взаимодействием протонного пучка с ионным следом, не приводящая к потере пучка (2). После выключения отсоса электронов эти колебания быстро затухают (2) и интенсивность пучка на орбите возрастает выше предела по пространственному заряду (1) [18], если интенсивность инжектируемого пучка превышала критическое значение. Если интенсивность инжектируемого пучка была ниже критического значения, то после выключения отсоса развивались интенсивные колебания и интенсивность накопленного пучка существенно уменьшалась.

После увеличения интенсивности пучка ионов  $H^-$  до 15 mA (ток инжектируемых атомов до 8 mA) стало возможным накапливать пучок с интенсивностью выше предела по пространственному заряду без отсоса электронов. Накопление пучка с интенсивностью выше предела по пространственному заряду показано на рис. 9. Если интенсивность инжектируемого пучка выше критической ( $\sim 5$  mA), то циркулирующий пучок накапливается выше предела по пространственному заряду, в пучке накапливается много положительных ионов, дипольные и квадрупольные колебания быстро затухают. Если интенсивность инжектируемого пучка ниже критической, то интенсивность циркулирующего пучка ограничивается на низком уровне (штриховые кривые на рис. 9а), положительные ионы не накапливаются в пучке, дипольные и квадрупольные колебания остаются большими. Стабилизация колебаний в этом случае объясняется уменьшением длины волны неустойчивых колебаний до поперечных размеров пучка, когда они становятся поверхностью и перестают влиять на объём пучка. Интенсивность накопленного пучка удалось довести до 1 A, что в шесть раз выше абсолютного предела по пространственному заряду (см. рис. 9), при котором пространственный заряд должен уменьшать фокусирующую



**Рис. 9.** (а) Накопление протонного пучка с интенсивностью выше предела по пространственному заряду, (б) зависимость интенсивности циркулирующего пучка от интенсивности инжектируемого пучка [16].

щую силу магнитной системы до нуля, и в 150 раз больше порога возникновения электрон-протонной неустойчивости (electron cloud effect). Попытка получения циркулирующего пучка с компенсированным пространственным зарядом предпринимается сейчас в Лаборатории им. Ферми на установке ИОТА [19].

Результаты исследования перезарядного метода инжекции протонов в ускорители изложены в работах [20, 21]. Обратная перезарядка протонов в атомы в мишениях из нейтральных частиц ограничивает время инжекции при энергиях, меньших  $10^6$  эВ. При больших энергиях существенно лишь многократное рассеяние циркулирующих протонов, лимитирующее время инжекции на уровне  $10^4$  оборотов. Помещая мишень в локальный минимум  $\beta$ -функции фокусирующей системы, можно уменьшить влияние многократного рассеяния и даже обеспечить затухание некогерентных бетатронных колебаний за счёт ионизационных потерь энергии в мишени [22]. Столь большая допустимая длительность высокоеффективного захвата протонов позволяет резко уменьшить требования на интенсивность инжектируемого пучка и, что особенно важно, при перезарядной инжекции снижаются требования на яркость инжектируемых пучков. Результаты, для получения которых при традиционных методах инжекции приходится инжектировать протонные пучки с предельно допустимой интенсивностью и яркостью, могут быть получены при использовании пучков  $H^-$  с интенсивностью и яркостью, меньшей в сотни раз.

Имеющиеся и разрабатываемые источники не обеспечивают инжекции в синхротроны достаточно интенсивных пучков, поляризованных по ядерному спину

ионов. В настоящее время разработаны источники с интенсивностью  $10^{-3}$  А. При использовании перезарядной инжекции такой интенсивности достаточно для заполнения бустерного синхротрона до предела по пространственному заряду [23].

Перезарядную инжекцию можно использовать и в циклотронах. Инжектируемые частицы можно пропускать к центру циклотрона в виде нейтральных частиц и перезаряжать (обдирать) на мишени, расположенной на первых оборотах. Такой метод инжекции использовался для инжекции поляризованных протонов в циклотроны.

### 3. Освоение перезарядной инжекции в мире

В 1968 г. ИЯФ посетил Р. Мартин и ознакомился с разработками по перезарядной инжекции. Р. Мартин решил, что перезарядная инжекция позволит Аргонинскому синхротрону с нулевым градиентом (ZGS), директором которого он был, конкурировать по интенсивности с Alternating Gradient Synchrotron (AGS, АГС) в Брукхейвенской национальной лаборатории (БНЛ) (Brookhaven National Laboratory, BNL). В 1969 г. перезарядная инжекция была успешно опробована в США на протонном синхротроне ZGS на энергию 12 ГэВ при энергии инжекции 50 МэВ [24]. Протоны захватывались на орбиту при перезарядке ионов  $H^-$  в протоны на мишени из тонкой органической пленки. По предложению Мартина была отработана перезарядная инжекция протонов в бустер для синхротрона ZGS [24, 25].

В 1971 г. была осуществлена перезарядная инжекция протонов в синхротрон на 200 МэВ — прототип бустера

для ZGS [25]. С 1977 г. в течение многих лет бустер служил интенсивным импульсным нейтронным генератором [26]. В 1978 г. перезарядная инжекция была освоена на бустере ФНАЛ (Fermi National Accelerator Laboratory) при энергии инжекции 200 МэВ [27]. В 1982 г. синхротрон AGS в БНЛ был переведён на перезарядную инжекцию [28]. В 1984 г. перезарядная инжекция была осуществлена в синхротроне ISIS в Rutherford Appleton Laboratory (RAL) [29]. В 1980–1984 гг. перезарядная инжекция была освоена в КЕК (Центр высоких энергий, Япония) [30], в DESY (Deutsches Electronen Synchrotron, Германия) [31]. Перезарядная инжекция используется на накопителе CELSIUS (Уппсала, Швеция) [32], в накопителе COSY (Исследовательский центр Юлих, Германия) [33, 34]. Перезарядная инжекция была использована в синхротроне Института теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова (Москва) для накопления ионов углерода [35]. Сейчас готовится переход на перезарядную инжекцию в бустере ЦЕРН (Женева, Швейцария) [36] и в бустере Института физики высоких энергий им. А.А. Логунова (Протвино, Россия) [37].

Импульсная интенсивность пучка в накопителе ограничивалась развитием электрон-протонной неустойчивости [38]. В 2006 г. в Оксфордской национальной лаборатории [39] заработал Spallation Neutron Source (SNS), интенсивный источник нейтронов с перезарядной инжекцией. Ионы  $H^-$  с током  $\sim 40$  мА ускоряются в сверхпроводящем линейном ускорителе до энергии 1 ГэВ и накапливаются в течение  $\sim 10^3$  оборотов в компактном накопительном кольце с периодом обращения 1 мкс (накопленный ток до  $\sim 50$  А, мощность до  $\sim 50$  ГВт).

#### 4. Инженерно-физические проблемы реализации перезарядной инжекции

Реализацию перезарядной инжекции рассмотрим на примере перезарядной инжекции в накопитель SNS. Используется схема, показанная на рис. 1. Обдирочная фольга помещается в рассеянное поле второго магнита с напряжённостью 0,25 Тл, за третьим магнитом располагается толстая обдирочная фольга, обдирающая остаточные ионы  $H^-$  и атомы (в том числе возбуждённые) до протонов, которые направляются в защищённый приёмник пучка. Обдирочная фольга прикреплена одной стороной к держателю. Фотография фольги на держателе приведена на рис. 10. Толщина фольги из мелкокристаллического углерода равна 350 мкг см<sup>-2</sup>, площадь 12 × 30 мм. Держатель фольги закрепляется на велосипедной цепи, и фольга подставляется под пучок нижним концом при перемещении цепи, как показано на рис. 10. Ободранные электроны имеют кинетическую энергию 0,5 МэВ и мощность 3 кВт при мощности пучка ионов  $H^-$ , равной 1 МВт. Электроны движутся по спиралям вокруг силовых линий магнитного поля к ловушке из графита на нижнем полюсе второго магнита под фольгой. Отражённые электроны могут повреждать держатель фольги. При средней мощности пучка до 1,4 МВт фольга выдерживает обдирку до  $5 \times 10^3$  Кл заряда ( $10^5$  импульсов). Это практически предельная интенсивность для углеродной фольги, так как фольга перегревается и углерод начинает сублимироваться. Сложные проблемы устойчивости перезарядной фольги обсуждаются в [40].

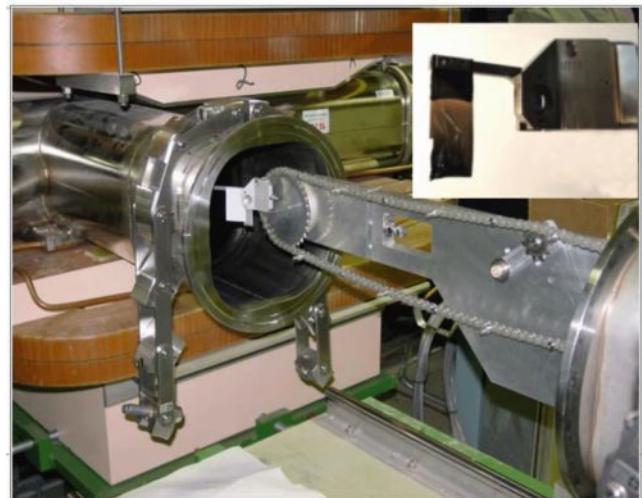


Рис. 10. Фотография обдирочной фольги на держателе SNS [40].

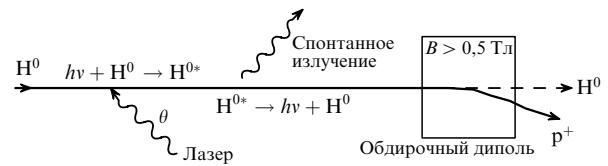


Рис. 11. Схема эксперимента по ионизации атомов водорода с энергией 1 ГэВ лазерным излучением для осуществления лазерной перезарядной инжекции [42].

В [41, 42] опробована лазерная ионизация ускоренных атомов  $H^0$  в протоны. Схема эксперимента показана на рис. 11. Первый электрон отрывается за счёт лоренцевской ионизации в сильном магнитном поле. Лазерное излучение встречается с пучком атомов  $H^0$  под углом  $\theta$  в лабораторной системе отсчёта. Частота лазерного излучения в системе покоя атомов  $H$ ,  $\omega_0$ , связана с частотой лазерного излучения в лабораторной системе  $\omega$  соотношением:  $\omega_0 = \omega(1 + \beta \cos \theta)$ , где  $\theta$  — угол между направлением лазерного излучения и направлением движения атомов,  $\gamma = 1/(1 - \beta^2)^{1/2}$  и  $\beta = v/c$ . Для верхнего возбуждённого состояния с  $n = 3$ , ионизуемого в магнитном поле,  $\omega_0 = 1,84 \times 10^{16}$  Гц и  $\lambda_0 = 102,6$  нм. Эта длина волны соответствует третьей гармонике 355-нм излучения с длиной волны 1064 нм при угле  $\theta = 1,064$  рад с пучком атомов с энергией 1 ГэВ. Структура лазерного излучения согласована со структурой пучка из линака (линейного ускорителя): импульсы длительностью 50 пс, следующие с частотой 402,5 МГц. Атомы с большей энергией имеют несколько меньший угол с излучением, что позволяет им находиться в резонансе с излучением. Длительность макроимпульса 10 мкс. Мощность излучения в импульсе  $\sim 1$  МВт. Этой мощности достаточно для лоренцевской обдирки 90 % возбуждённых атомов во втором магните (см. рис. 11). Следующим шагом должно быть использование оптического резонатора для накопления лазерного излучения для увеличения длительности обдирки атомов до 1 мс.

История обнаружения электрон-протонной (e–p) неустойчивости показана на рис. 12 [43]. В 1965 г., как ясно теперь, e–p-неустойчивость наблюдалась на ZGS в ANL и на AGS в BNL, но только в ИЯФ (INP) она была тогда правильно интерпретирована, объяснена и подавлена

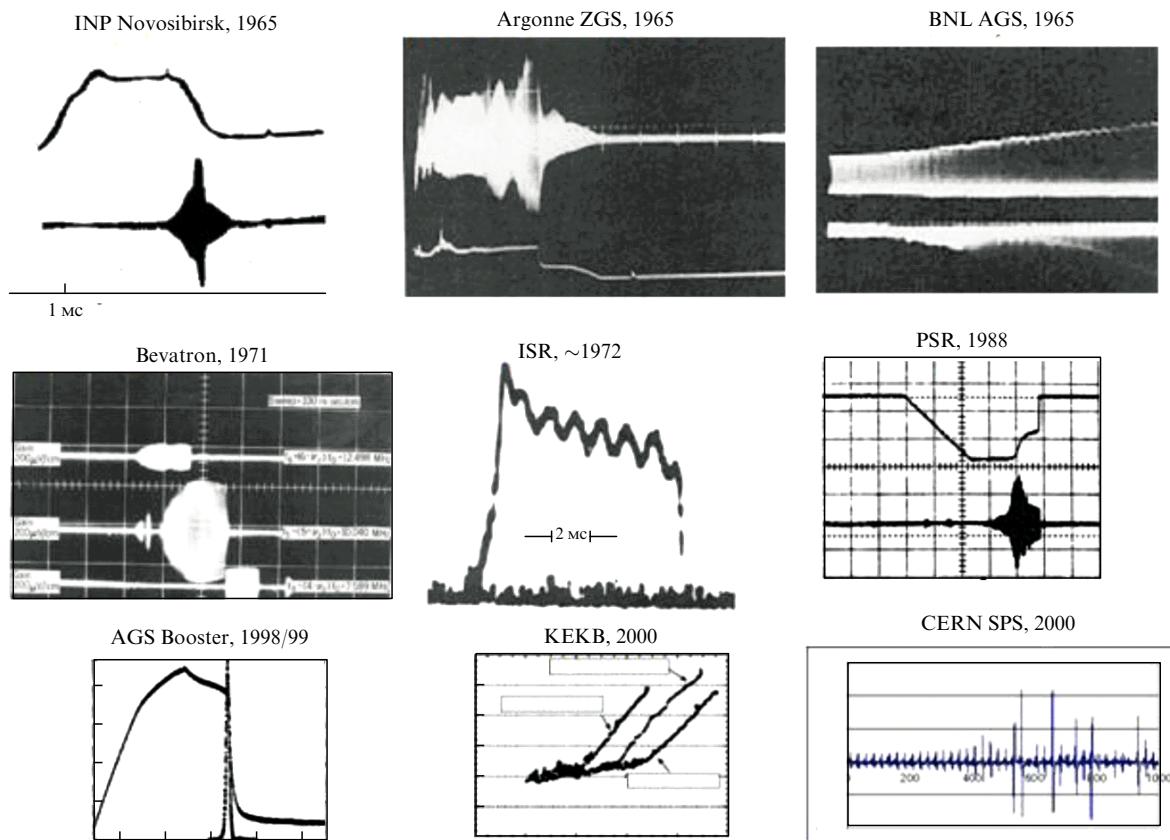


Рис. 12. История обнаружения электрон-протонной неустойчивости в мире [43].

[44]. В Беватроне (Bvatron) в 1971 г. е–р-неустойчивость была подавлена отрицательной обратной связью. На пересекающихся протонных пучках (ISR, Geneva, CERN) в 1972 г. эта неустойчивость создавала фон для детектора. В Лос-Аламосской национальной лаборатории (LANSC, PSR) с 1988 г. эта неустойчивость ограничивала импульсную интенсивность пучка. С 2000 г. е–р-неустойчивость ограничивает интенсивность пучков на Б-фабриках, интенсивных накопителях позитронных пучков и в накопителях протонных и ионных пучков в RHIC (BNL) и в Большом адронном коллайдере (LHC, Geneva, Switzerland).

Для обеспечения потребностей перезарядной инжекции необходимы надёжно работающие источники ионов  $H^-$  с импульсной интенсивностью до 100 мА и большой скважностью, что стало возможным после открытия и разработки в ИЯФ СО АН СССР поверхностно-плазменного метода получения отрицательных ионов с цезиеванием [45] и разработки поверхностно-плазменных источников интенсивных, ярких пучков отрицательных ионов [46–49].

## 5. Заключение

Успешная разработка перезарядной инжекции в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН открыла возможности для широкого применения перезарядной инжекции на всех ионных ускорителях. Без перезарядной инжекции потери инжектируемых пучков составляют ~10 %, тогда как перезарядная инжекция позволяет их уменьшить до 0,02 % [50].

Обнаружение и объяснение электрон-протонной неустойчивости стало важным достижением в физике интенсивных ионных пучков. Эта неустойчивость до сих пор ограничивает интенсивность крупнейших ускорителей и накопителей.

Получение циркулирующих пучков с интенсивностью гораздо выше предела по пространственному заряду и разработка системы ВЧ-ускорения с компенсацией пространственного заряда [51] открывают надежду на значительное повышение интенсивности циклических ускорителей.

## Список литературы

1. Alvarez L W *Rev. Sci. Instrum.* **22** 705 (1951)
2. Димов Г И, Препринт № 304 (Новосибирск: ИЯФ СО АН СССР, 1969); [http://irbiscorp.spsl.nsc.ru/fulltext/prepr/1969/p1969\\_304.pdf](http://irbiscorp.spsl.nsc.ru/fulltext/prepr/1969/p1969_304.pdf)
3. Будкер Г И, Димов Г И, в сб. *Труды Международ. конф. по ускорителям, Дубна, 21–27 августа 1963 г.* (Под ред. А А Коломенского и др.) (М.: ОИЯИ, 1964) с. 933
4. Lebedev V, Shiltsev V (Eds) *Accelerator Physics at the Tevatron Collider* (New York: Springer, 2014)
5. Димов Г, Дудников В *Физика плазмы* **4** 3 (1978); Dimov G I, Dudnikov V G *Sov. J. Plasma Phys.* **4** 3 (1978)
6. Будкер Г И и др. *Атомная энергия* **19** 507 (1965); Budker G I et al. *Sov. Atom. Energy* **19** 1479 (1965)
7. Budker G et al., in *Proc. of the Intern. Symp. on Electron and Positron Storage Ring, France, Sakley, 1966*, Rep. VIII, 6.1
8. Будкер Г И, Димов Г И, Дудников В *Атомная энергия* **22** 348 (1967); Budker G I, Dimov G I, Dudnikov V G *Sov. Atom. Energy* **22** 441 (1967)
9. Дудников В Г "Получение интенсивного протонного пучка в накопителе методом перезарядной инжекции", Дисс. ... канд. физ.-мат. наук (Новосибирск: ИЯФ СО АН СССР, 1966)

10. Димов Г И "Перезарядная инжекция в ускорители и накопители", Дисс. ... докт. физ.-мат. наук (Новосибирск: ИЯФ СО АН СССР, 1968)
11. Rumolo G et al. *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **6** 081002 (2003)
12. Шамовский В Г "Исследование взаимодействия пучка с ионизованным газом", Дисс. ... канд. физ.-мат. наук (Новосибирск: ИЯФ СО АН СССР, 1972)
13. Чириков Б В *Атомная энергия* **19** 239 (1965); Chirikov B V *Sov. Atom. Energy* **19** 1149 (1965)
14. Koshkarev D, Zenkevich P *Part. Accel.* **3** 1 (1972)
15. Bosch R A *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **6** 074201 (2003)
16. Бельченко Ю И и др., в сб. *Труды X Международ. конф. по ускорителям заряженных частиц высоких энергий, Протвино, июль 1977* (Серпухов: Институт физики высоких энергий, 1977); Препринт № 77-59 (Новосибирск: ИЯФ СО РАН, 1977)
17. Reiser M *Theory and Design of Charged Particle Beams* 2nd ed. (Weinheim: Wiley-VCH, 2008)
18. Димов Г И, Шамовский В Г, Чуприянов В Е *ЖТФ* **41** 2098 (1971); Dimov G, Chupriyanov V, Shamovsky V *Sov. Phys. Tech. Phys.* **16** 1662 (1971)
19. Park C S et al. "Space charge compensation using electron columns and electron lenses at IOTA", in *Proc. of the 2nd North American Particle Accelerator Conference, NAPAC2016, Chicago, Illinois, USA, October 9–14, 2016* (Eds V R W Schaa) (Geneva: JACoW, 2017) THA3C004
20. Dimov G I, Chupriyanov V E *Part. Accel.* **14** 155 (1984)
21. Dimov G I *Rev. Sci. Instrum.* **67** 3393 (1996)
22. Dudnikov V, Ankenbrandt C "Beam brightness booster with charge exchange injection and superintense circulating beams production" *Conf. Proc. C110904* 1789 (2011); in *Particle Accelerator. Proc. of the 2nd Intern. Conf., IPAC 2011, San Sebastian, Spain, September 4–9, 2011* (Ed. C Petit-Jean-Genaz) (Geneva: EPS-AG, 2011)
23. Belov A S et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **333** 256 (1993)
24. Martin R, in *Proc. of The 8th Intern. Conf. on High-Energy Accelerators, 20–24 Sep. 1971, Geneva, Switzerland* (Geneva: CERN, 1971) c. 540
25. Simpson J D *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **20** 198 (1973)
26. Simpson J, Martin R, Kustom R "History of the ZGS 500 MeV booster", <https://doi.org/10.2172/885494>
27. Hojvat C et al. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **26** 3 (1979)
28. Barton D S "Charge exchange injection at the AGS", BNL Intern. Rep. 32784 PAC (Santa Fe, NM: BNL, 1983)
29. Kempson V C, Planner C W, Pugh V T *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **28** 3085 (1981)
30. Kawakubo T et al., in *Proc. of the 13th Intern. Conf. on High-Energy Accelerators, HEACC 1986, Novosibirsk, Soviet Union, August 07–11, 1986* (Ed. A N Skrinsky) (Novosibirsk: Nauka, 1987) p. 286; KEK-Preprint-86-53; [http://inspirehep.net/record/234778/files/HEACC86\\_II\\_287-290.pdf](http://inspirehep.net/record/234778/files/HEACC86_II_287-290.pdf)
31. Crieger L et al. *Rev. Sci. Instrum.* **62** 867 (1991)
32. Hermansson L et al., in *Proc. of the Workshop on Beam Cooling and Related Topics, Montreux, Switzerland, 4–8 October 1993* (CERN 94-03, Ed. J Bosser) (Geneva: CERN, 1994) p. 235
33. Baldin A M, Kovalenko A D *JINR Rapid Commun.* (3) 5 (1996)
34. Сидорин А О "Формирование интенсивных ионных пучков в накопителях с многооборотной перезарядной инжекцией и электронным охлаждением", Дисс. ... канд. физ.-мат. наук (Дубна: ОИЯИ, 2003)
35. Алексеев Н Н, Кошкадев Д Г, Шарков Б Ю *Письма в ЖЭТФ* **77** 149 (2003); Alekseev N N, Koshkarev D G, Sharkov B Yu *JETP Lett.* **77** 123 (2003)
36. Lettry J et al. *AIP Conf. Proc.* **1655** 030005 (2015)
37. Frolov B A, Klenov V S, Mihailov V N, Volodkevich O M, in *Proc. of the XXIV Russian Particle Accelerator Conf., RuPAC'2014, Obninsk, Russia, 6–10 October, 2014*, p. 429
38. Macek R J et al., in *Proc. of the 1993 Particle Accelerator Conf., PAC 93, May 17–20, 1993, Washington, D.C., USA* (Piscataway, NJ: IEEE, 1993) p. 3739
39. Wei J et al. *Phys. Rev. ST Accel. Beam* **3** 080101 (2000)
40. Plum M "AAC — HEBT/Ring/RTBT overview", Plum-AAC-Feb10\_r1.pptx (2010)
41. Cousins S et al. *Phys. Rev. Lett.* **118** 074801 (2017)
42. Danilov V et al., in *Proc. of the Particle Accelerator. 23rd Conf., PAC'09, Vancouver, Canada, May 4–8, 2009* (Eds M Comyn et al.) (Geneva: JACoW, 2010) p. 1629
43. Zimmermann F *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **7** 124801 (2004)
44. Budker G et al. "Experiments on electron compensation of proton beam in ring accelerator", in *Proc. of the VI Intern. Conf. on High-Energy Accelerators, 11–15 September 1967*
45. Дудников В Г "Способ получения отрицательных ионов", Авторское свидетельство, 411542, заявлено 10/III, 1972, Опубликовано 15/1/1974; <http://www.findpatent.ru/patent/41/411542.html>; [https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:9355182](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:9355182)
46. Belchenko Yu, Dimov G, Dudnikov V "Physical principles of surface plasma source operation", in *Symp. on the Production and Neutralization of Negative Hydrogen Ions and Beams, Brookhaven, 1977* (Upton, NY: BNL, 1977) p. 79; [http://irbiscorp.spsl.nsc.ru/fulltext/prepr/1977/p1977\\_56.pdf](http://irbiscorp.spsl.nsc.ru/fulltext/prepr/1977/p1977_56.pdf)
47. Дудников В Г "Источник отрицательных ионов водорода с Пеннинговской геометрией", в сб. *Труды Всесоюз. совещания по ускорителям заряженных частиц Т. 1* (М.: Наука, 1975) с. 323
48. Dimov G I, Derevyakin G E, Dudnikov V G *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **24** 1545 (1977)
49. Дудников В Г "Поверхностно-плазменный метод получения пучков отрицательных ионов", Дисс. ... докт. физ.-мат. наук (Новосибирск: ИЯФ СО АН СССР, 1976)
50. Plum M A "H<sup>-</sup> charge exchange injection issues at high power", in *Proc. of the 57th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity, High Brightness and High Power Hadron Beams, HB2016, 3–8 July 2016, Sweden* (Eds M Eshraqi, G Trahern, V R W Schaa) (Geneva: JACoW, 2016) p. 304
51. Dudnikov V, Dudnikov A "Acceleration system of beam brightness booster", in *Proc. of the North American Particle Accelerator Conf., PAC2016, Chicago, IL, USA, October 9–14, 2016* (Eds M Power et al.) (Geneva: JACoW, 2017) p. 796

### Charge exchange injection into accelerators and storage rings

**V.G. Dudnikov**

Novosibirsk State University, ul. Pirogova 2, 630090 Novosibirsk, Russian Federation;  
Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
prosp. Akademika Lavrent'eva 11, 630090 Novosibirsk, Russian Federation  
E-mail: dvg43@yahoo.com

Development of charge exchange injection at the Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, mastering of charge exchange injection at research centers worldwide, and the experimental observation, explanation, and damping of electron-proton instability (electron cloud effect) are reviewed. Techniques for preparing a circulating proton beam whose intensity is an order of magnitude higher than the space-charge limit are considered. The problems of stripping-foil stability in the process of injection of intense beams and laser ionization of accelerated atoms are discussed.

**Keywords:** charge exchange injection, storage ring, RF field, induction acceleration, space charge compensation, e-p instability

PACS numbers: 29.20.D –, 29.27.–a

Bibliography — 51 references  
*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **189** (4) 433–440 (2019)  
DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2019.02.038528>

Received 5 March 2018, revised 31 January 2019  
*Physics – Uspekhi* **62** (4) (2019)  
DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2019.02.038528>