

то по окончании НГУ ты станешь аспирантом ИЯФ*, а не будет такой статьи — будешь аспирантом НГУ".

По приезде Роальда из отпуска на его столе лежала эта статья, и он договорился с Львом Андреевичем о рассказе её на семинаре "Т" (семинаре по термояду) в ЛИПАНе (так тогда назывался Институт Курчатова — Лаборатория измерительных приборов АН). Через день после доклада на семинаре Сагдеев сказал мне, что Лев Андреевич предлагает представить мою дипломную работу в ДАН (см. [2]), но перед этим он бы хотел со мной поговорить.

Разговор с Арцимовичем мне запомнился на всю жизнь. Я был просто потрясён увиденным и услышанным. Мне в голову не приходило, что сделанное мною можно было так просто показать на пальцах. Всё, кроме некоторого коэффициента $k \ll 1$, Лев Андреевич сумел объяснить на совершенно тривиальном уровне.

Чтобы не быть голословным, я попробую в течение нескольких минут пролистать пять страниц моего диплома.

Здесь показаны основные используемые в работе [2] уравнения, описывающие динамику слабоионизованной плазмы, где электроны замагничены, а ионы нет:

$$\frac{d}{dx}(T\delta n) - en_0 \frac{d}{dx} \delta\varphi + \frac{e}{c} n_0 \delta v_{ey} B + \frac{d \ln n(x)}{dx} T \delta n = 0, \quad (1)$$

$$ik_y T \delta n - ik_y en_0 \delta\varphi - \frac{e}{c} n_0 \delta v_{ex} B = 0, \quad (2)$$

$$ik_z T \delta n - ik_z en_0 \delta\varphi = -n_0 m_e (v_{ei} + v_{en}) \delta v_{ez} - n_0 m_e v_{ei} \delta v_{iz}, \quad (3)$$

$$i\omega \delta n + \text{div}(\mathbf{v}_{e0} \delta n) + \text{div}(\delta \mathbf{v}_e n_0) = 0, \quad (4)$$

$$i\omega m_i \delta v_{ix} + e \frac{d}{dx} \delta\varphi = 0, \quad (5)$$

$$\omega m_i \delta v_{iy} + ek_y \delta\varphi = 0, \quad (6)$$

$$\omega m_i \delta v_{iz} + ek_z \delta\varphi = 0, \quad (7)$$

$$i\omega \delta n + \text{div}(n_0 \delta \mathbf{v}_i) + \text{div}(\mathbf{v}_{i0} \delta n) = 0, \quad (8)$$

где T — температура электронов (в предположении, что $T_e \gg T_i$); e — заряд электрона; c — скорость света в вакууме; m_e , m_i — соответственно массы электрона и иона; v_{ei} , v_{en} — частоты соответственно электрон-ионных, электрон-нейтральных столкновений; \mathbf{v}_e , \mathbf{v}_i — направленные скорости соответственно электронов и ионов. В уравнениях (5)–(7) мы пренебрегли диссипативными членами ввиду условия $\omega \gg v_{in}$.

Система уравнений (1)–(8) в области максимальной плотности может быть сведена к уравнению типа Шрёдингера

$$\frac{d^2 \delta\varphi}{dx^2} + 2 \left(E - \frac{\tilde{\omega}^2 x^2}{2} \right) \delta\varphi = 0 \quad (9)$$

для линейного осциллятора с комплексными энергией

$$E = \frac{ik_z^2 \frac{\omega^2}{v_{en}} \frac{m_i}{m_e} + \frac{v_{en}}{v_{en} + v_{ei}} \omega k_z^2}{2 \left(i \frac{k_z^2}{v_{en}} \frac{T}{m_e} - \omega + \frac{\omega^2}{\omega_{Hi}} \frac{1}{k_y} \frac{d \ln n_0}{dx} \right)} - \frac{k_y^2}{2} \quad (10)$$

и частотой

$$\tilde{\omega}^2 = - \frac{\frac{\omega^2}{\omega_{Hi}} \frac{\ln' n_0}{k_y} \frac{1}{R^2} \left(ik_z^2 \frac{\omega^2}{v_{en}} \frac{m_i}{m_e} + \frac{v_{en}}{v_{en} + v_{ei}} \omega k_z^2 \right)}{\left(i \frac{k_z^2}{v_{en}} \frac{T}{m_e} - \omega + \frac{\omega^2}{\omega_{Hi}} \frac{1}{k_y} \frac{d \ln n_0}{dx} \right)^2}. \quad (11)$$

Как известно, решение такого уравнения находится в виде функций Эрмита:

$$\delta\varphi_{\tilde{n}} = \left(\frac{\tilde{\omega}}{\pi} \right)^{1/4} \frac{1}{\sqrt{2^{\tilde{n}} \tilde{n}!}} \exp \left(-\frac{\tilde{\omega}}{2} x^2 \right) H_{\tilde{n}}(x\sqrt{\tilde{\omega}}), \quad (12)$$

где $H_{\tilde{n}}(x\sqrt{\tilde{\omega}})$ — функция Эрмита, $\tilde{n} = 0, 1, 2, \dots$

В результате можно найти величину напряжённости критического магнитного поля

$$B_c \sim \frac{c}{e} \sqrt[4]{T \frac{m_e m_i^2}{R^2} v_{en} v_{in}}, \quad (13)$$

которое совпадает с данными в работе Желе [1] (теоретическая кривая легла на экспериментальные точки).

В работе [2] была найдена новая неустойчивость, зависимость инкремента которой от величины магнитного поля оказалась обратной той, которая имела место для инкремента дрейфовой неустойчивости. Поэтому эта новая неустойчивость была названа мною "антидрейфовой".

Так, с "благословения" Л.А. Арцимовича была опубликована моя первая статья по гидродинамическим неустойчивостям, любовь к красивой физике которых сохранилась у меня, благодаря Льву Андреевичу, навсегда. Именно поэтому и основная тема моего выступления на научной сессии ОФН РАН, посвящённой памяти Л.А. Арцимовича "Предсказание и открытие сильнейших гидродинамических неустойчивостей, вызванных скачком скорости: теория и эксперименты" (одноимённый обзор [3], опубликованный в УФН в прошлом году, отражает содержание моего сегодняшнего выступления).

Список литературы

1. Geller R *Phys. Rev. Lett.* **9** 248 (1962)
2. Фридман А М *ДАН СССР* **154** 567 (1963) [Fridman A M *Sov. Phys. Dokl.* **9** 75 (1964)]
3. Фридман А М *УФН* **178** 225 (2008) [Fridman A M *Phys. Usp.* **51** 213 (2008)]

PACS numbers: **01.65. +g**, **28.60. +s**, 29.25.Ni
DOI: 10.3367/UFNr.0179.200912n.1354

Электромагнитное разделение изотопов и его наследие

Ю.В. Мартыненко

В докладе даётся краткая история развития в СССР электромагнитного метода разделения изотопов, а также его наследия — новых направлений науки и техники, порождённых работами по электромагнитному разделению изотопов.

Сейчас имя Льва Андреевича Арцимовича ассоциируется прежде всего с термоядерным синтезом и термоядерной энергией. С самого начала Л.А. Арцимович

* НГУ — Новосибирский государственный университет, ИЯФ — Институт ядерной физики СО АН СССР. (Примеч. ред.)

возглавлял эти исследования в СССР, и благодаря ему токамаки стали основным направлением термоядерных работ во всём мире. Однако масштаб Арцимовича как учёного проявился ранее в связи с другой крупнейшей научной проблемой XX в. — Атомным проектом СССР — разработкой атомного оружия [1].

С самого начала работ по созданию атомной бомбы проблемой номер один стало получение делящегося вещества — собственно "взрывчатки". Таким веществом мог быть либо плутоний, либо уран-235. Для получения плутония надо было построить атомный реактор и там "наработать" плутоний. Такой реактор, первый на континенте, был запущен 25 декабря 1946 г. в Курчатовском институте, но "наработка" плутония заняла более двух лет. Уран-235 надо было выделить из природного урана при его содержании там всего 0,72 %. Работы по получению плутония-239 и выделению урана-235 из природного сырья велись одновременно, причём разрабатывалось сразу несколько методов выделения урана-235: газодиффузный метод (руководитель И.К. Кикоин), центробежный метод (Ф.Ф. Ланге и И.К. Кикоин) и электромагнитный метод (Л.А. Арцимович). Отправной точкой начала серьёзных работ по электромагнитному разделению изотопов можно считать записку И.В. Курчатова Л.П. Берии об учёных, привлечение которых необходимо для работ по проблеме (24 ноября 1944 г.). В этой записке И.В. Курчатова дал такую характеристику Л.А. Арцимовичу [1]:

"Проф[ессор] Л.А. Арцимович

Профессор, доктор физ[ико]-мат[ематических] наук Л.А. Арцимович является завед[ующим] лабораторией Физико-техн[ического] института Ак[адемии] наук СССР и консультантом Лабор[атории] № 2 Ак[адемии] наук СССР (теперь *Российский научный центр (РНЦ) "Курчатовский институт"* (КИ). — Ю.В.М.). Л.А. Арцимович — очень способный физик, глубокий и лучший в Союзе знаток электронной оптики. В основном он занят сейчас решением вопроса видения в темноте и только часть времени уделяет работам по магнитному способу выделения урана-235. Я считаю необходимым полное переключение его на эту последнюю работу".

Решение было принято незамедлительно, и к концу 1944 г. под руководством Л.А. Арцимовича в Лаборатории № 2 был организован сектор № 5 (разделение изотопов урана ионным методом), а также сектор № 1 Ленинградского физико-технического института (ЛФТИ) (ныне — Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН (ФТИ)). Началась интенсивная работа по электромагнитному методу разделения изотопов.

Параллельно с 1945 г. работы по электромагнитному методу разделения изотопов проводились в Сухуми под руководством немецкого физика Манфреда фон Ардене, который согласился работать в Советском Союзе. Там работали как немецкие, так и наши специалисты.

Проблема состояла в том, чтобы на основе принципа масс-спектрометра — прибора, разделяющего ускоренные ионы по массам в поперечном магнитном поле, — создать крупномасштабное производство разделения изотопов урана. До того времени масс-спектрометр, предложенный Демстером ещё в 1918 г. [2], использовался для анализа малых количеств вещества.

Проблема разбивалась на три крупных блока задач: 1) сильноточный ионный источник, 2) ионная оптика сильноточных пучков и 3) приёмник ионов и выделение

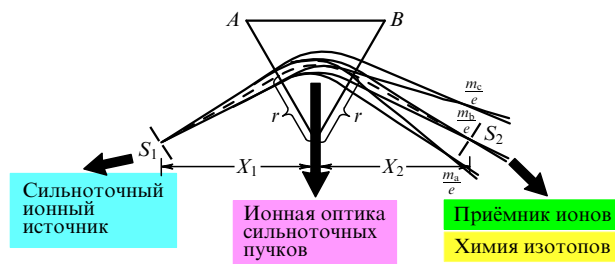


Рис. 1. Схема электромагнитного разделения изотопов и блоки основных проблем.

изотопа урана-235 из приёмника (рис. 1). Принцип действия и основные параметры разработанной и построенной электромагнитной установки для разделения изотопов описаны в 1957 г. [3], когда стали публиковаться такие материалы.

Источники ионов существовали и ранее, они использовались в масс-спектрометрах, но ток в них составлял несколько наноампер, а для выполнения поставленной задачи надо было иметь ток величиной хотя бы в одну десятую долю ампера — разница 7–8 порядков величины. Кроме того, необходимо было, чтобы источник работал непрерывно несколько десятков часов — нужна была высокая производительность.

Выбор методов ионизации вещества показал явное преимущество ионизации электронным ударом, поскольку позволял ионизовать любое вещество, если только его можно получить в газообразном состоянии. Разрабатывалось несколько видов ионных источников, в том числе независимо в Сухумском физико-техническом институте под руководством Ардене. Но источник Курчатовского института И-22 [4] был признан лучшим и "принят на вооружение".

Этот источник использует дуговой разряд с накаливаемым катодом в продольном магнитном поле, ионы вытягиваются поперёк магнитного поля через щель ускоряющим напряжением (рис. 2). В качестве рабочего вещества вначале использовался UF₄, поскольку фтор имеет только один изотоп. Однако четырёхфтористый уран имеет необходимую упругость пара $P = 10^{-2}$ торр при температуре 800 °С, а при такой температуре тигли испарителя быстро прогорали. Поэтому после проведения экспериментов перешли с сентября 1946 г. на работу с

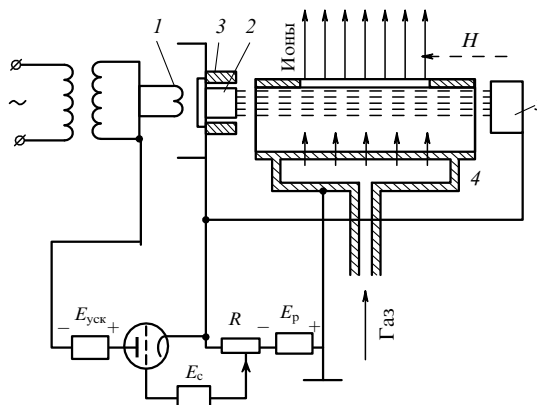


Рис. 2. Схема ионного источника: 1 — вольфрамовая нить, 2 — подогреваемый катод, 3 — экран, 4 — анодная камера, 5 — отражатель.

UCl_4 , у которого температура испарения составляет всего 400°C , хотя он имеет два изотопа: ^{35}Cl (75,4 %) и ^{37}Cl (24,6 %). Подбор режимов работы источника с UCl_4 позволил получить ток ионов U^+ величиной до 80 % от полного тока.

Была проведена большая работа по выбору оптимальных режимов: давления в рабочей камере, разрядного тока и разрядного напряжения. Например, малое разрядное напряжение не обеспечивает достаточно эффективной ионизации, а слишком большое напряжение вызывает сильное распыление катода и, кроме того, даёт значительную долю многозарядных ионов U^{+2} и U^{+3} , что снижает ток однозарядных ионов U^+ . Естественно, оптимизация велась по максимальному току однозарядных ионов U^+ и по ресурсу непрерывной работы источника.

На параметры пучка, вытягиваемого из ионного источника, оказывало влияние и распределение подачи пара в источник. Было найдено, что наилучшая, прямоугольная, форма пучка получается, когда подача пара возрастала от катода к аноду.

Много забот доставили колебания разряда в источнике, которые вызывали также колебания пучка в разделительной камере. Специальные исследования показали, что эти колебания возникают вследствие колебаний объёмного заряда у катода. Влияние этих колебаний на вытягиваемый пучок удалось уменьшить, отодвинув вытягивающую щель от катода.

Более подробно о работах по физическим проблемам электромагнитного разделения изотопов можно прочесть в обзоре [5], написанном заместителем Л.А. Арцимовича в Курчатовском институте М.К. Романовским. Обзор хорошо передаёт драматизм возникавших проблем и поиска их решений, он написан в основном по воспоминаниям, поскольку в те годы публикаций на эту тему не было, отчёты не сохранились.

Разработку ионных источников вели в лаборатории П.М. Морозова сектора № 5 Л.А. Арцимовича. В работе принимали участие М.С. Иоффе, А.В. Жаринов, Б.Н. Маков, Ю.Д. Пигаров, В.И. Агафонов, В.В. Жуков, Б.Г. Брежнев, Н.И. Чижов, С.М. Нафтулин, Л.И. Староверов и Э.Н. Браверман.

Ионная оптика сильноточных пучков. Требовалось получить хорошо сфокусированные пучки изотопов с дисперсией, по крайней мере, 1 см при разнице масс $\Delta M/M = 1\%$, для того чтобы каждый из ионов ^{235}U и ^{238}U попадал в свою ячейку приёмника.

В ионном источнике область движения первичных электронов и ионизации хорошо локализована вследствие замагниченности электронов, но диффундирующие поперёк магнитного поля ионы и электроны создают у стенки камеры вторичную плазму, из которой ионы могут уходить на стенку камеры. Для уменьшения ухода ионов на стенку камеры стенка находится под потенциалом анода. Щель в стенке камеры позволяет вытягивать ионы из камеры с помощью системы электродов (рис. 3). При этом ускоряющее напряжение должно быть достаточно большим (более 2,5 кВ, а реально использовались ускоряющие напряжения 30–50 кВ), иначе граница вторичной плазмы проникает в щель и вытягиваемый пучок оказывается расходящимся.

При увеличении ускоряющего напряжения граница плазмы приближается к столбу первичной плазмы, поскольку увеличивается скорость ионов и уменьшается

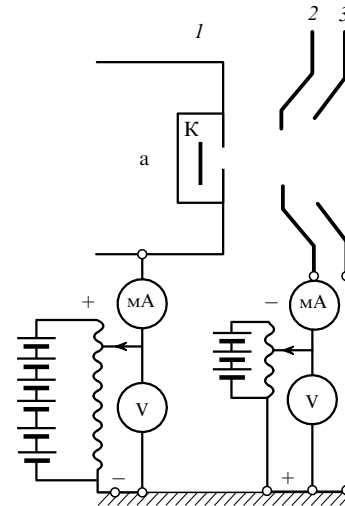


Рис. 3. Схема трёхэлектродной оптики.

их плотность в пучке. Вначале применили систему двух электродов (первый электрод — стенка камеры, второй — ускоряющий). Однако испытание системы двух электродов показало, что она не может обеспечить компенсацию объёмного заряда в пучке ионов, так как в этом случае все электроны, возникающие при ионизации пучком остаточного газа в разделительной камере, уходят на второй электрод. В результате объёмный заряд пучка оказывается нескомпенсированным, пучок расходится вследствие кулоновского растаскивания и разделение изотопов становится возможным лишь при ничтожно малых токах. Кроме того, ускоряющий электрод может плавиться под действием на него электронного тока. Был предложен третий электрод, с меньшим отрицательным потенциалом, чем у второго электрода. При этом несколько тормозятся ионы, но между вторым и третьим электродами образуется электронное облако, которое обеспечивает автоматическую компенсацию объёмного заряда пучка за счёт ионизации остаточного газа при токах меньших $\sim 100 \text{ mA cm}^{-2}$. Для компенсации больших токов была предложена "плазменная завеса". Над третьим электродом был установлен накаливаемый катод с потенциалом 250–300 В относительно третьего электрода, в результате в плоскости щели загорался разряд, через который свободно проходили ионы из источника, но электроны не могли пройти в источник и шли на компенсацию объёмного заряда.

Другая важная проблема — колебания сильноточного ионного пучка — оказалась связанной как с работой ионного источника, так и с компенсацией объёмного заряда пучка.

Так, было установлено, что флуктуации плотности ионного тока j , вызванные колебаниями в ионном источнике, должны быть меньше скорости ионизации остаточного газа

$$\frac{dj}{dt} < jnv\sigma,$$

где n — концентрация остаточного газа, v — скорость ионов, σ — сечение ионизации. В противном случае колебания в пучке усиливаются за счёт декомпенсации объёмного заряда.

Кроме того, колебания могут возникать и в самой ионной оптике. Поле второго электрода может прони-

катель в щель за третий электрод, и медленные вторичные ионы, дрейфуя в скрещенном $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ -поле, скапливаются у третьего электрода и создают объёмный заряд, который возрастает до тех пор, пока не произойдёт выброс медленных ионов ко второму электроду и восстановление поля E . После чего процесс повторяется. Для подавления этих колебаний потенциал второго электрода относительно третьего не должен быть ниже определённой величины для данного источника.

Колебания в пучке возникают также в результате неоднородности пучка по сечению вследствие неоднородности скорости ионизации и возникающих объёмных зарядов. Эта проблема решалась, как было сказано ранее, подбором распределения подачи газа в ионный источник.

Даже приведённый краткий и весьма неполный обзор возникавших проблем показывает сложность общей задачи и взаимосвязь её частей. Решение этих проблем находилось как с помощью расчётов, так и эмпирическим подбором. В частности, геометрия электродов и расстояния между ними выбирались как с помощью электролитической ванны, так и непосредственно в установке.

Вопросами ионной оптики занимались В.С. Золотарев, А.Ф. Малов, А.М. Андрианов, Г.Я. Щепкин, С.Ю. Лукьянов, В.А. Суздальцев, В.М. Кельман и Е.П. Федосеев [6], а также сотрудники лаборатории Н.В. Федоренко в ЛФТИ. Обширные теоретические исследования атомных столкновений были проведены О.Б. Фирсовым.

Л.А. Арцимович принимал активное участие во всех работах, но особенно много внимания уделял ионной оптике, проводил конкретные расчёты. Им было предложено использовать магнитное поле, спадающее по радиусу, что увеличивало дисперсию по массам. Это предложение было реализовано позднее.

О масштабах проделанной работы можно судить по тому, что только на одной установке [7] было проведено около 1500 многочасовых экспериментов, а установок было несколько и работали они "в параллель", одновременно.

Приёмник ионов требовал разобраться в совершенно новых явлениях взаимодействия ионов с твёрдым телом. Тогда было не ясно, что происходит, когда быстрый ион падает на поверхность твёрдого тела: то ли он отражается, то ли внедряется в поверхность. Какова роль распыления? Возможно, все ионы, которые внедряются в поверхностный слой, потом распыляются вместе с этим слоем. Основные исследования в этой области, которые проводились непосредственно по ходу разработки приёмника ионов, явились началом большого направления науки о взаимодействии ионов с поверхностью.

Основные требования к приёмнику — это максимальное улавливание разделённых изотопов и малое разрушение под действием бомбардирующих ионов. Для того чтобы отражённые ионы не уходили из приёмника, пучок ионов должен падать под углом к поверхности. Тогда отражённые ионы направляются внутрь приёмника. Но при наклонном падении возрастает коэффициент распыления и быстрее разрушается приёмник. Все эти трудности были преодолены, и был создан приёмник, обеспечивающий одновременный приём и хорошее разделение всех изотопов, ресурс работы которого составлял 10000 ампер-часов.

Разрабатывалась также рекуперация энергии побочных ионов (таких, как ионы Cl^+). Для этого создавались приёмники с торможением, что снижало нагрузку на высоковольтный выпрямитель примерно вдвое, поскольку ток ионов U^+ составлял $\sim 50\%$. Рекуперировать энергию основных пучков нельзя, так как при этом происходит потеря собираемых ионов. Поэтому в дальнейшем, при использовании электромагнитного метода для получения стабильных изотопов, когда нужны все изотопы, от рекуперации отказались.

В Курчатовском институте проблемы приёмника ионов решали И.Н. Головин, Б.В. Панин, В.Г. Тельковский, в Сухуми — М. Ардене, В.М. и М.И. Гусевы, Р.А. Демирханов, Д.В. Чукаели.

Вся работа велась очень интенсивно. Вот поэтапно ход работ и достижений [1].

5 ноября 1945 г. Л.А. Арцимовичем (Лаборатория № 2) получено за сутки 70 микрограммов урана-235, обогащённого до 12–15%.

Конец 1946 г. Сектором № 5 Лаборатории № 2 и сектором № 1 ЛФТИ выполнены следующие работы:

1) теоретически и экспериментально изучены различные типы систем ускорения и формирования ионного потока;

2) разработано несколько экспериментальных типов ионных источников;

3) проведён анализ состава ионов при использовании ионного источника с четырёхфтористым ураном в качестве рабочего вещества;

4) спроектированы и изготовлены разделительные камеры для проведения первоначальных опытов по разделению изотопов.

Обогащение урана более 90%. Ионный ток 20 мА. Источники работают 1–2 ч.

Полученный опыт позволил начать проектирование и изготовление опытного промышленного образца разделительной установки на заводе № 814 (Свердловск-45).

Конец 1947 г. Величина ионного тока доведена до 50 мА, 8–10 ч непрерывной работы.

IV квартал 1950 г. На установке СУ-20 (20 разделительных камер) завода № 814 (Свердловск-45) получена первая партия высокообогащённого урана-235. Ионный ток 100 мА. Продолжительность работы источников — до двух суток. Таким образом, было создано промышленное выделение урана-235 для атомной бомбы. Параллельно с работами по электромагнитному методу выделения урана-235 велись работы по молекулярным методам разделения изотопов на заводе № 813 (Челябинск-40) под руководством И.К. Кикоина. Молекулярные методы, обладающие значительным превосходством по производительности, не могли дать более 75% обогащения по изотопу урана-235. В то время как для атомной бомбы нужен был уран с 94%-ным обогащением. Первая советская атомная бомба, испытанная в августе 1949 г., использовала плутоний, полученный в атомном реакторе. Вторая атомная бомба, испытанная в октябре 1951 г., использовала уран-235. Для неё был взят уран с 75%-ным обогащением, полученный на заводе № 813 и доведённый до нужной кондиции электромагнитным методом.

Однако в октябре 1951 г. ввиду прогресса молекулярных методов разделения изотопов по обогащению урана-235 Распоряжением Совета Министров СССР завод № 814 как самостоятельное предприятие был ликвидирован. Установки по электромагнитному раз-

делению изотопов вошли в состав оборудования завода № 418, ориентированного на производство ${}^6\text{Li}$ для водородной бомбы с использованием реакции ${}^6\text{Li} + n \rightarrow \text{T} + {}^4\text{He} + 4,785 \text{ МэВ}$, согласно предложению В.Л. Гинзбурга, впервые изложенному им в секретных отчётах от 2 декабря 1948 г., 3 марта и 23 августа 1949 г. (см. подробнее [8]). Задача была успешно разработана, и в марте 1953 г. была испытана первая советская водородная бомба, использующая ${}^6\text{Li}$, полученный полностью электромагнитным методом. Это имело огромное значение для приоритета Советского Союза.

После этого успеха более 3500 человек были награждены Сталинскими премиями, среди них именно за электромагнитный метод разделения изотопов были награждены сотрудники Курчатовского института Л.А. Арцимович, И.Н. Головин, П.М. Морозов, А.М. Андрианов, Г.Я. Щепкин, Б.А. Алексеев, В.С. Золотарёв, Б.Н. Маков, С.Ю. Лукьянов, М.С. Иоффе, В.В. Жуков, а также сотрудники Сухумского физико-технического института М. Ардене, В.М. Гусев, Р.А. Демирханов, Д.В. Чукасели.

Две первые водородные бомбы использовали ${}^6\text{Li}$, полученный электромагнитным методом, после чего производство ${}^6\text{Li}$ перешло на молекулярные методы. А мощные электромагнитные установки стали применять для разделения стабильных изотопов. К началу 1970-х годов были разработаны технологии разделения необходимых стабильных изотопов более 40 элементов. В СССР на установке СУ-20 были получены стабильные изотопы многих элементов в количестве от нескольких долей грамма до многих килограммов (в зависимости от распространённости в природе). Началось широкое применение стабильных изотопов для медицинских целей, ядерно-физических исследований, метода "меченых атомов" в биологии, нейтронно-активационного анализа в геологии и др.

Существенно повышено качество изотопов, прежде всего изотопного обогащения, что связано со строительством новых электромагнитных установок, предназначенных для разделения стабильных изотопов. Сейчас применяются установки С-2 и С-5М. Для сепарации используются неоднородные магнитные поля, что увеличивает дисперсию в 2–5 раз. Созданию таких установок способствовали работы Л.А. Арцимовича, А.Ф. Малова, Е.П. Федосеева и др.

Весьма важно также для дальнейшего развития метода продолжающееся совершенствование источников ионов для электромагнитной сепарации. Разработаны источники ионов с высокой эффективностью по разделяемому веществу, высокотемпературные источники ионов с рабочей температурой до 1500 °С, пригодные для промышленного получения изотопов элементов платино-палладиевой группы без применения газообразного фтора (без негативного влияния на окружающую среду), а также других элементов с высокой температурой испарения.

Электромагнитный метод, хотя и не может обеспечить высокой производительности, присущей молекулярным методам, тем не менее до сих пор играет заметную роль в производстве стабильных изотопов. Только этим методом сейчас производятся изотопы 25–30 элементов. Среди них — все редкоземельные элементы, щелочноземельные и щелочные элементы, таллий и др.

Таблица (составлена Р.Н. Кузьминым в 1998 г.)

Элемент, изотоп	Установка	Природная концентрация, %	Достигнутое обогащение	Кратность обогащения
${}^{176}\text{Yb}$	С-2	12,7	99,43	1030
${}^{168}\text{Yb}$	С-2	0,13	86,9	5096
${}^{168}\text{Yb}$	С-2	0,13	82,4	3597
${}^{160}\text{Gd}$	С-5М	21,9	99,87	2740
${}^{157}\text{Gd}$	С-5М	15,7	99,5	1070
${}^{151}\text{Eu}$	С-2	47,77	99,91	1213
${}^{153}\text{Eu}$	С-2	52,23	99,97	3047
${}^{104}\text{Pd}$	С-2	11,1	99,1	882
${}^{102}\text{Pd}$	С-2	1,0	95,5	2100
${}^{67}\text{Zn}$	С-5М	4,1	97,0	750

Сейчас лаборатория электромагнитного разделения изотопов Института ядерного синтеза (ИЯС) РНЦ "Курчатовский институт" производит следующие стабильные изотопы: Ca, Cd, Gd, Eu, Hg, Pd, Sm, Tl, Yb, Zn, которые поставляются на внутренний и внешний рынки: в Германию, Иран, Канаду, Китай, Южную Корею, США, Тайвань, Узбекистан, Францию, Швецию, Японию. В таблице представлены производимые в лаборатории изотопы и кратность их обогащения [9].

Однако основной ценностью является не столько получение стабильных изотопов электромагнитным методом, сколько богатейший опыт научных и технических решений, полученный при разработке электромагнитного разделения изотопов.

Ионные источники, разработанные тогда, легли в основу большинства ионных источников, используемых теперь в экспериментальных и технологических ионно-пучковых установках.

По-видимому, первым "нецелевым" применением разработанного сильноточного ионного источника был нейтронный источник для исследовательских целей, созданный в конце 1950-х годов. При этом использовалась ионная имплантация. Ионы дейтерия с энергией 200 кэВ внедрялись в титан до достижения концентрации, близкой к соотношению 1:1, после чего тот же пучок ионов дейтерия, бомбардирующий титан, насыщенный дейтерием, давал нейтроны в результате реакции $\text{D} + \text{D} \rightarrow n + {}^3\text{He}$. Эта же реакция использовалась тогда же В.М. и М.И. Гусевыми для изучения распределения по глубине внедрения дейтерия в металлы.

На основе ионного источника, разработанного в секторе П.М. Морозова (рис. 4) при участии группы конструкторов "Института двигателей" (Особое конструкторское бюро (ОКБ) "Заря"), в 1960-х годах был создан космический ионный двигатель. В состав коллектива курчатовцев, создававших двигательный блок, входили Н.Ф. Балаев, А.Г. Зимелёв, А.Я. Козлов, Р.Н. Кузьмин, Л.И. Староверов, Ю.Д. Пигаров, Л.Н. Пильгунов, Н.И. Чижов и ряд других сотрудников. В содружестве с курчатовцами работал коллектив конструкторов и экспериментаторов ОКБ "Заря": Хан Гирун, В.А. Ветров, М.Т. Дедюхин, Г.М. Антропов, В.А. Щепетиллов и др. Многощелевая модель ионного двигателя тягой 10 г, работающая на висмуте, продемонстрировала в 1968 г. ресурс непрерывной работы 3016 ч. Проведённые в эти годы исследования выявили несколько положительных особенностей ионных двигателей по сравнению с другими типами электрических ракетных двигателей (ЭРД):

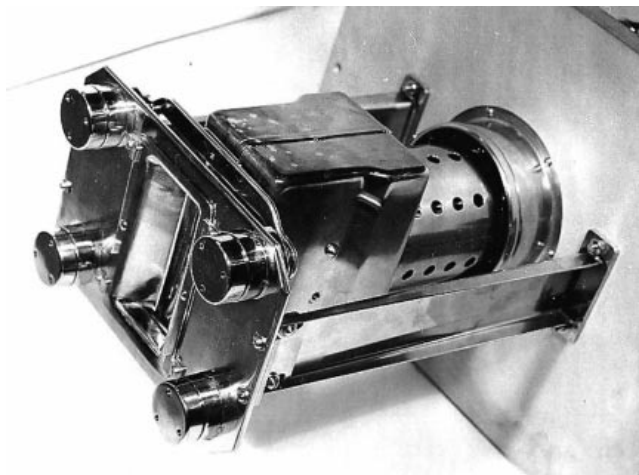


Рис. 4. Сильноточный ионный источник И-22, разработанный в лаборатории П.М. Морозова.

- более высокий энергетический к.п.д.;
- возможность большего удельного импульса, т.е. отношения тяги к весовому секундному расходу рабочего тела;
- большой ресурс работы;
- более широкий выбор рабочих тел.

Этими особенностями уже в те годы определилась наиболее предпочтительная область использования ионных двигателей — прежде всего для длительных космических кампаний. Плазменные двигатели выглядели предпочтительнее для ближнего космоса как маневровые двигатели, способные за относительно короткое время переводить космические объекты с одной орбиты на другую.

По инициативе А.Г. Зимелёва в декабре 1971 г. был выведен на орбиту искусственный спутник Земли "Метеор" с ионным двигателем "Зефир" (рис. 5), рабо-



Рис. 5. Ионный двигатель "Зефир".

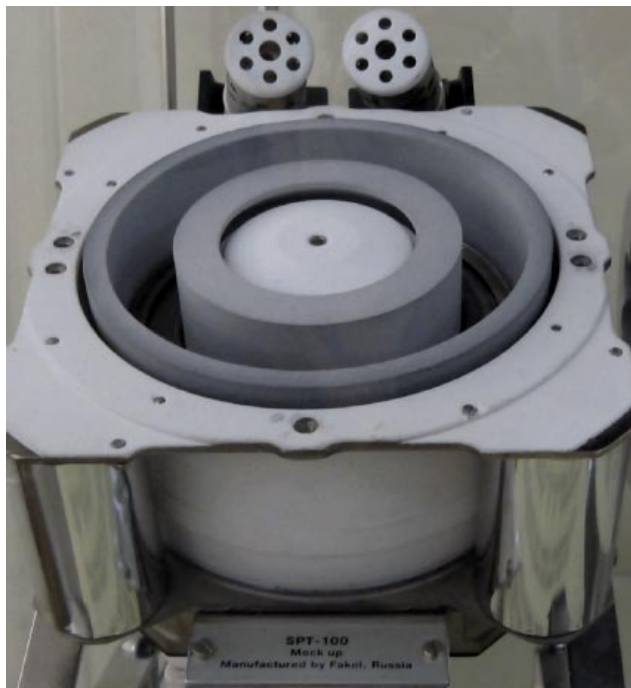


Рис. 6. Стационарный плазменный двигатель "Эол".

тающий на жидкометаллическом рабочем теле (ртути), а также стационарный плазменный двигатель (СПД) "Эол" (рис. 6) конструкции А.И. Морозова [10], также сотрудника отдела плазменных исследований Л.А. Арцимовича. Испытания обоих космических двигателей прошли успешно. Было подтверждено соответствие всех параметров ионного двигателя ожидаемым величинам, в том числе соответствие расчётной и реально создаваемой им тяги.

Однако сейчас ионные двигатели не находят применения, так как сфера их предпочтительного использования — это длительные космические полёты. При этом нужна более мощная бортовая электроэнергетика, которой сейчас нет. О многолетней космической одиссее на космическом корабле с маршевыми ионными двигателями пока можно только мечтать. В то же время стационарные плазменные двигатели сегодня востребованы, поскольку в настоящее время практическому космосу необходимы маневровые двигатели, способные за относительно короткое время переводить космические объекты с одной орбиты на другую, а таковыми на сегодня, без сомнения, являются СПД.

На основе ионных источников, созданных в лаборатории П.М. Морозова, были разработаны ионные источники многозарядных ионов для циклотрона в Дубне. С их помощью в лаборатории Г.Н. Флёрова были получены искусственные трансурановые элементы. За эти работы коллектив, возглавляемый Г.Н. Флёровым, получил в 1975 г. Государственную премию, в том числе Б.Н. Маков, сотрудник Курчатовского института, разработавший источник многозарядных ионов.

Ионная оптика также дала хорошее наследие. В ионных имплантёрах и ионных инжекторах используются непосредственно решения, найденные при разработке электромагнитного разделения изотопов.

Проблему нейтрализации ионных пучков, возникшую в случае сильноточных пучков электромагнитного

метода разделения изотопов, потребовалось решать и для космических двигателей. Для ионного космического двигателя "Зефир" эффективный плазменный нейтрализатор разработали Р.Н. Кузьмин и Н.Ф. Балаев. Ещё ранее, в 1966–1970 годах, нейтрализатор использовался на ионосферной лаборатории "Янтарь".

Проблемы сильноточных ионных пучков стимулировали глубокие исследования физики атомных столкновений. Мировую известность приобрели работы в этой области лаборатории Н.В. Федоренко в ФТИ, а также О.Б. Фирсова и В.А. Беляева в Курчатовском институте. За цикл работ "Элементарные процессы и неупругое рассеяние при атомных столкновениях" В.В. Афросимов, В.А. Беляев, В.М. Дукельский, Н.В. Федоренко и О.Б. Фирсов в 1972 г. были удостоены Ленинской премии.

Но, пожалуй, наибольшее наследие дали работы по взаимодействию ионов с поверхностью, начатые при разработке приёмника ионов. Исследования взаимодействия ионов с поверхностью были развёрнуты ещё шире после окончания работ по получению урана-235 и лития-6. Такие исследования проводили, прежде всего, В.М. и М.И. Гусевы, бывшие сотрудники Сухумского физико-технического института, перешедшие в Курчатовский институт в начале 1960-х годов, а также Б.В. Панин, В.Г. Тельковский и В.М. Чичеров — сотрудники отдела Л.А. Арцимовича в Курчатовском институте, В.А. Молчанов, Е.С. Машкова — сотрудники кафедры "Атомной физики и электронных явлений" физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, которую возглавлял Л.А. Арцимович. Лев Андреевич организовал на этой кафедре серьёзные исследования взаимодействия ионов с поверхностью. В Курчатовском институте был изготовлен масс-монохроматор (масс-сепаратор) и передан в Научно-исследовательский институт ядерной физики (НИИЯФ) МГУ (там работали сотрудники кафедры Л.А. Арцимовича). Исследования взаимодействия ионов с поверхностью были развёрнуты также на кафедре электроники физфака МГУ В.Е. Юрасовой и в Ташкенте в Институте электроники АН УЗССР У.А. Арифовым, выпускником Ленинградского университета, имевшим тесные связи с ФТИ и с Курчатовским институтом. Эти лаборатории заняли ведущие позиции в мире.

Ионное распыление твёрдых тел было изучено главным образом в конце 1950-х годов и в 1960-х годах. Благодаря этим исследованиям теперь можно управлять процессами эрозии в самых разных ионно-пучковых и плазменных установках, включая термоядерные, в том числе в ИТЭР (Международном экспериментальном термоядерном реакторе). Распыление широко используется также и в технологиях нанесения покрытий самого разного назначения.

Проводились глубокие исследования отражения ионов от поверхности, ион-ионной эмиссии (с использованием вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС)), которые легли в основу современных методов диагностики поверхности.

Сотрудники кафедры Л.А. Арцимовича и его отдела в Курчатовском институте сделали официально зарегистрированное открытие "Явление анизотропии ионно-электронной эмиссии монокристаллов" (Е.С. Машкова, В.А. Молчанов, Д.Д. Одинцов, В.Г. Тельковский и

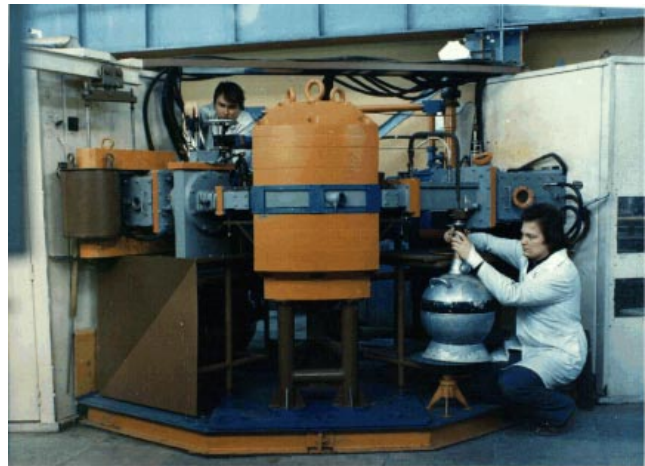


Рис. 7. Ионно-пучковый ускоритель ИЛУ. Энергия ионов — до 40 кэВ, общий ток — до 30 мА, магнитное поле — до 5500 Э. Площадь обработки $15 \times 20 \text{ см}^2$. Вид ионов — большинство элементов периодической системы.

В.М. Чичеров. Диплом на открытие № 126 с приоритетом 13 октября 1960 г.).

Замечательным наследием электромагнитного разделения изотопов стала ионная имплантация. В.М. и М.И. Гусевы одними из первых поняли, что установки для электромагнитного разделения изотопов, позволяя управлять внедрением ионов в поверхностные слои, наилучшим образом подходят для легирования полупроводников с целью получения р–n-перехода вблизи поверхности. Впервые инверсию типа проводимости в германии р-типа получил М.М. Бредов в 1961 г., облучая германий ионами Li^+ . В том же году В.М. и М.И. Гусевы получили электронно-дырочные переходы в кремнии, облучая его ионами III и V групп. В 1963 г. в отделе Л.А. Арцимовича в Курчатовском институте была создана лаборатория ионной бомбардировки (ЛИБ), руководимая В.М. Гусевым. Фундаментальные работы, выполненные в ЛИБ в 1960-х годах и начале 1970-х годов, заложили основу метода ионной имплантации полупроводников. В результате в 1979 г. коллективу сотрудников во главе с М.И. Гусевой за работу "Разработка и освоение серийного выпуска специального технологического ионно-лучевого оборудования; разработка основ промышленной технологии ионной имплантации для серийного производства и создания новых типов полупроводниковых приборов и интегральных схем для народного хозяйства и оборонной техники" была присуждена Государственная премия СССР в области науки и техники.

Заложив основы ионной имплантации полупроводников, ЛИБ перешла с середины 1970-х годов на решение других проблем: исследование взаимодействия плазмы с поверхностью в связи с термоядерными исследованиями и на ионную имплантацию непроводниковых материалов. Ионная имплантация полупроводников уже имела хорошую основу для дальнейшего развития.

Сейчас в ЛИБ работает ионно-пучковый ускоритель ИЛУ (импульсный линейный ускоритель) [11] с разделением ионов по массам — фактический аналог масс-сепаратора С-5М (рис. 7). Ускоритель ИЛУ используется как для научных целей, так и в технологии ионной

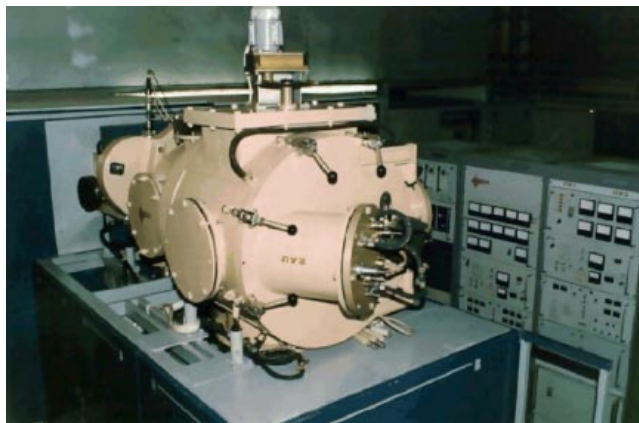


Рис. 8. Имплантационно-плазменный ускоритель "Вита". Энергия: высокоэнергичные ионы — $4,0 \times 10^4$ эВ, низкоэнергичные ионы — 250–300 эВ. Плотность тока: высокоэнергичные ионы — $2,0 \times 10^{-4}$ А см⁻², низкоэнергичные ионы — $2,5 \times 10^{-2}$ А см⁻². Площадь обработки 110 × 250 мм².

имплантации. Ионная имплантация металлов позволяет увеличить их твёрдость, коррозионную стойкость, износостойкость и уменьшить коэффициент трения. Она успешно применяется для волочильного, режущего и штамповочного инструментов. Ионная имплантация эластомеров также повышает их износостойкость и уменьшает коэффициент трения. Эластомерные вкладыши дейдвудных подшипников ледокола "Арктика" после ионной имплантации выдержали поход на Северный полюс и не потребовали после этого замены. Тогда как вкладыши из эластомеров лучших зарубежных фирм требуют замены после каждого крупного похода. Ионная имплантация эластомеров использовалась также для вкладышей дейдвудных подшипников ледокола "Леонид Брежнев" и для вкладышей насосов на Калининской атомной электростанции в г. Удомля.

Позднее был создан имплантационно-плазменный ускоритель "Вита" [12], в котором имеются пучки ионов высокой (до 40 кэВ) и низкой (250–300 эВ) энергии (рис. 8).

Установки "Вита" применяются на Уфимском моторостроительном объединении для ионной имплантации при финишной обработке лопаток компрессора, увеличивая в 2,5–3 раза время их жизни по сравнению с таковым в традиционной технологии.

Сейчас разработана комбинированная технология — вакуумное нанесение покрытий из плазмы (в том числе, реактивное осаждение) сочетается с одновременной ионной имплантацией пучком высокоэнергетических (до 50 кэВ) ионов металлов (рис. 9). Такая комбинированная технология улучшает адгезию покрытий, в том числе многослойных, а также их технические характеристики (твёрдость, износостойкость и др.).

Комбинированная технология будет применяться в совместном проекте Роснано, Научно-производственного объединения (НПО) "Сатурн" и Газпромбанка (создание инструментального завода в Рыбинске НПО "Сатурн" на основе технологий и оборудования РНЦ КИ).

В заключение можно сказать, что электромагнитное разделение изотопов сыграло ключевую роль в осуществлении Атомного проекта СССР и инициировало

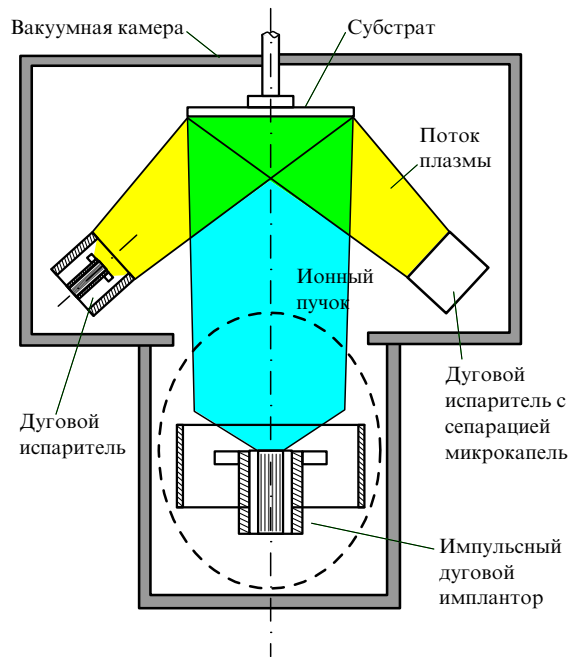


Рис. 9. Установка для комбинированной технологии, сочетающей вакуумное плазменное нанесение покрытий и облучение ионным пучком.

многочисленные направления исследований, приведшие к замечательным достижениям не только научного плана, но и к современным технологиям. Плоды наследия электромагнитного метода разделения изотопов принесут ещё немало успехов.

Я благодарен за помощь [Р.Н. Кузьмину], В.М. Чеснокову, В.А. Щепетиллову, В.Г. Столяровой, С.Н. Коршунову, И.Д. Скорлупкину, Л.И. Елизарову, В.А. Беляеву и Г.А. Елисееву.

Список литературы

1. Рябев Л Д (Общ. ред.), Гончаров Г А (Отв. сост.) *Атомный проект СССР. Документы и материалы Т. 2 Атомная бомба. 1945–1954* (М.: Физматлит; Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2000)
2. Dempster A J *Phys. Rev.* **11** 316 (1918)
3. Арцимович Л А и др. *Атомная энергия* **3** 483 (1957) [Artsimovich L A et al. *At. Energy* **3** 1361 (1957)]
4. Морозов П М, Маков Б Н, Иоффе М С *Атомная энергия* **2** 272 (1957) [Morozov P M, Makov B N, Ioffe M S *At. Energy* **2** 327 (1957)]
5. Романовский М К *Физика плазмы в проблеме электромагнитного разделения изотопов* (М.: Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова, 1990)
6. Малов А Ф, в сб. *Некоторые вопросы экспериментальной и теоретической физики* (М.: Атомиздат, 1964) с. 54
7. Золотарев В С, Ильин А И, Кома Е Г "Разделение изотопов на электромагнитных установках в Советском Союзе", в сб. *Труды 2-й междунар. конф. по мирному использованию атомной энергии, Женева, 1958. Доклады советских ученых Т. 6* (М.: Атомиздат, 1959) с. 87
8. Гончаров Г А *УФН* **166** 1095 (1996) [Goncharov G A *Phys. Usp.* **39** 1033 (1996)]
9. Игнатенко В Г "Стабильные изотопы. Основные применения", Препринт ИАЭ-4832/12 (М.: ЦНИИАтоминформ, 1989)
10. Арцимович Л А и др. *Космические исследования* **12** 451 (1974) [Artsimovich L A et al. *Cosmic Res.* **12** 414 (1974)]
11. Гусев В М и др. *ПТЭ* (4) 19 (1969)
12. Гусева М И "Ионная имплантация в металлы" *Поверхность* (4) 27 (1982)