

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Новосибирский национальный исследовательский государственный
университет»**

Физический факультет

**Квалификационная работа на соискание
степени магистра**

Кафедра физики плазмы

Мишенин Дмитрий Викторович

Название работы:

**Система цезирования для сильноточных источников отрицательных
ионов**

Научный руководитель:

канд. физ.-мат. наук Константинов С.Г

Новосибирск – 2012 год

ВВЕДЕНИЕ	2
ГЕНЕРАЦИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ	3
РАБОТА ВЫХОДА ЦЕЗИЕВОГО СЛОЯ.....	5
ДЕСОРБЦИОННЫЙ ПОТОК ИЗ НЕПОЛНОГО ЦЕЗИЕВОГО СЛОЯ	6
ДАВЛЕНИЕ ПАРОВ ЧИСТОГО ЦЕЗИЯ	7
ХИМИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ ЦЕЗИЯ	8
АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ	8
АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАВИСИМОСТИ РАБОТЫ ВЫХОДА ОТ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЯ	9
СИСТЕМА ЦЕЗИРОВАНИЯ	11
ГАЛЕРЕЯ РАЗДАЧИ	13
КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ ЦЕЗИРОВАНИЯ	14
СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА	16
ИСТОЧНИКИ ЦЕЗИЯ	18
ПОВЕРХНОСТНО ИОНИЗАЦИОННЫЙ ЗОНД	18
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА	20
ЗАВИСИМОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫХОДА ЦЕЗИЯ ОТ РАЗМЕРОВ ОТВЕРСТИЙ.....	20
ВЛИЯНИЕ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫХОДА ЦЕЗИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЛЕРЕИ	22
ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОДАЧИ ЦЕЗИЯ	22
НЕОБХОДИМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ	23
ОСНОВНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ.....	23
МОДЕЛИРОВАНИЕ В CREATVAC	24
РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	25
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ	27
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	28

Введение

Главная задача исследования управляемого термоядерного синтеза – это получение устойчивой, долгоживущей горячей плазмы. Одной из главных проблем физики УТС является проблема ввода в плазму мощности, необходимой для нагрева до термоядерной температуры. В настоящее время используются различные методы дополнительного нагрева плазмы. И одним из самых эффективных является инжекция в плазму пучков быстрых атомов (нейтральная инжекция, NBI - в общепринятом английском сокращении). Инжекционный метод нагрева основан на взаимодействии частиц плазмы с высокоэнергетичными частицами атомарного пучка.

Инжекция нейтралов может служить не только для нагрева плазмы, но и для ее создания и поддержания. Она может быть использована для получения бесстолкновительной плазмы, генерации безындукционного тока, вращения плазмы с целью повышения устойчивости. Все это делает технологию нейтральной инжекции перспективной для реакторных приложений.

Основным элементом в инжекторе нейтралов является источник отрицательных или положительных ионов, которые разгоняются до необходимой энергии, а затем нейтрализуются на газовой мишени. Для современных магнитных ловушек, имеющих большие размеры, необходимо использовать пучки нейтралов с высокой энергией частиц, до 1 МэВ. И в то время как эффективность нейтрализации пучка положительных ионов водорода с энергией 1 МэВ стремится к нулю, для отрицательных ионов она составляет около 60% (рис. 1). Это объясняется тем, что дополнительный электрон слабо связан с атомом водорода (средство к электрону 0,75эВ) и легко отрывается при взаимодействии с другими частицами.

Технология получения пучков отрицательных ионов является более сложной, чем технология получения положительных пучков. К тому же, пучок отрицательных ионов в большей степени подвержен различным разрушающим процессам, и, как правило, плотность тока, получаемая в источнике отрицательных ионов, на порядок меньше плотности тока, получаемой в источнике положительных ионов с сопоставимыми характеристиками. Однако все сложности, возникающие при создании и транспортировке пучка отрицательных ионов, окупаются за счет высокой эффективности нейтрализации.

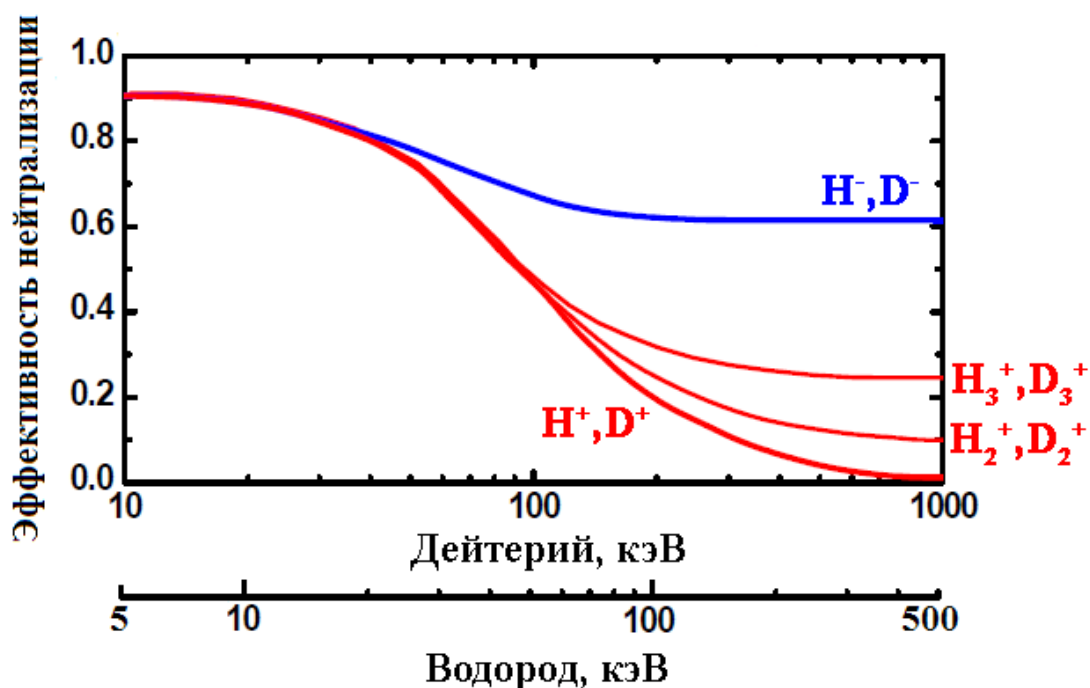


Рисунок 1. Зависимость эффективности нейтрализации пучка от его энергии.

Генерация отрицательных ионов

В Институте ядерной физики им. Будкера разрабатываются различные инжекторы отрицательных ионов на большие токи. (типичная схема источника изображена на рисунке 2). Проектируемые источники относятся к типу поверхностно-плазменных источников отрицательных ионов, в которых ионы генерируются по принципу описанному далее.

Генерация отрицательных ионов происходит за счет конверсии положительных ионов и нейтральных атомов на поверхности с низкой работой выхода (рис. 3). ВЧ драйвер создает водородную плазму, которая при помощи магнитной системы удерживается в расширительной камере. Из этой плазмы на поверхность сетки ионно-оптической системы летят положительные ионы и нейтральные атомы водорода. Налетающие частицы перезаряжаются на поверхности сетки, имеющей низкую работу выхода, до состояния H^- . Образующиеся отрицательные ионы вытягиваются ионно-оптической системой и формируются в пучок. Ионы H^- образуются и на других поверхностях камеры источника, а также в объеме самой плазмы. Однако вклад таких частиц очень незначителен, так как длина пробега отрицательного иона до акта рекомбинации мала по сравнению с размерами источника.

Чистая поверхность металла имеет недостаточно низкую работу выхода для генерации нужного количества отрицательных ионов. Для того чтобы уменьшить работу выхода, поверхность плазменной сетки покрывают тонким слоем цезия.

Щелочные металлы, к которым относится цезий, имеют очень низкую работу выхода. Этим объясняется их широкое технологическое применение, например они используются для получения светочувствительных поверхностей в фотокатодах. Удобной единицей для описания степени покрытия поверхности цезием является монослой (1 мнсл). Один монослой соответствует $4,5 \times 10^{14}$ атомам на см^2 на металлической подложке.

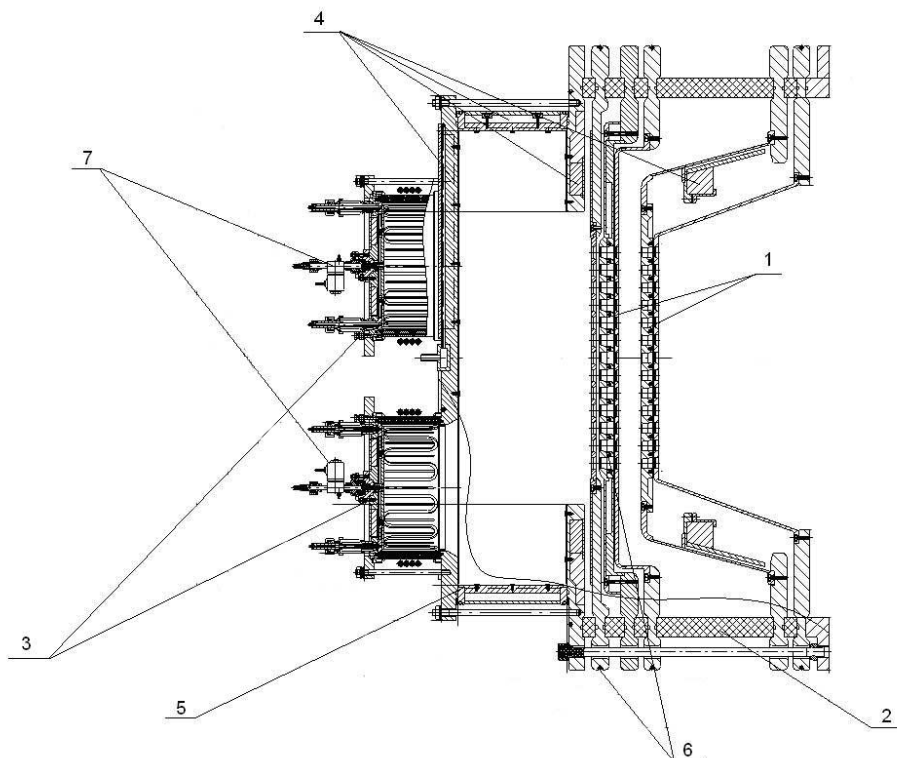


Рисунок 2. Схема источника отрицательных ионов. 1 – сетка ИОС, 2 – керамический изолятор, 3 – ВЧ драйверы, 4 – постоянные магниты, 5 – расширительная камера, 6 – водяное охлаждение, 7 – газовые натекатели.

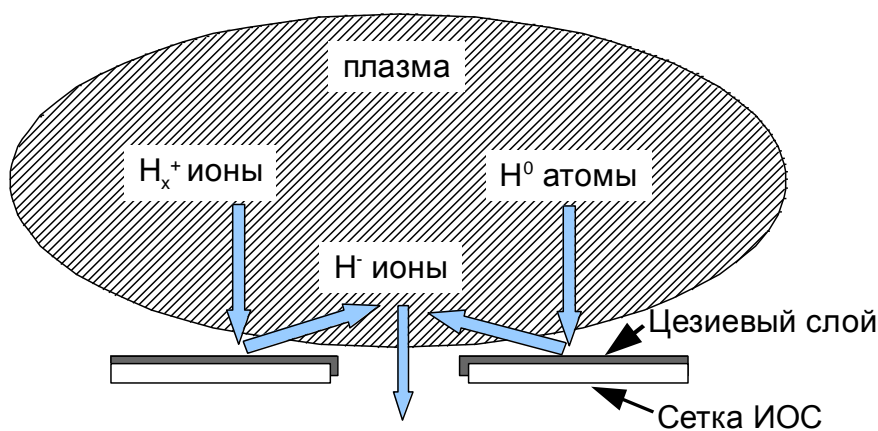


Рисунок 3. Схема поверхностной генерации отрицательных ионов.

Работа выхода цезиевого слоя.

Следует заметить, что наименьшая работа выхода поверхности определяется не чистым цезиевым слоем. Наиболее низкая работа выхода достигается при частичном покрытии металлической подложки (менее 1 монослоя) за счет дипольного взаимодействия атомов цезия с атомами металла.

Значение работы выхода поверхности металла ϕ_{sub} уменьшается с увеличением коэффициента покрытия щелочным металлом до минимального значения ϕ_{min} , соответствующего коэффициенту покрытия σ_{min} . При увеличении степени покрытия выше σ_{min} происходит увеличение работы выхода и последующий выход на постоянную величину ϕ_{equ} , соответствующую состоянию, при котором работа выхода определяется только цезием. Этот физический процесс отображен на рисунке 4. Минимум работы выхода достигается при значении коэффициента покрытия $\sigma_{min} = 0,5 - 0,7$ монослоев, в зависимости от материала подложки. Значение минимума работы выхода лежит в интервале $\phi_{min} = 1,4 - 1,6$ эВ, и также зависит от материала подложки. На рисунке 4 представлен обзор значений ϕ_{sub} , ϕ_{min} , ϕ_{equ} для различных материалов подложки. Значение работы выхода при покрытии более одного слоя $\phi_{equ} = 2,14$ эВ обуславливается только цезием, то есть не зависит от материала подложки.

Уменьшение работы выхода происходит благодаря формированию химического соединения цезия и металла подложки, образующего дипольный слой. За счет этого работа выхода значительно снижается.

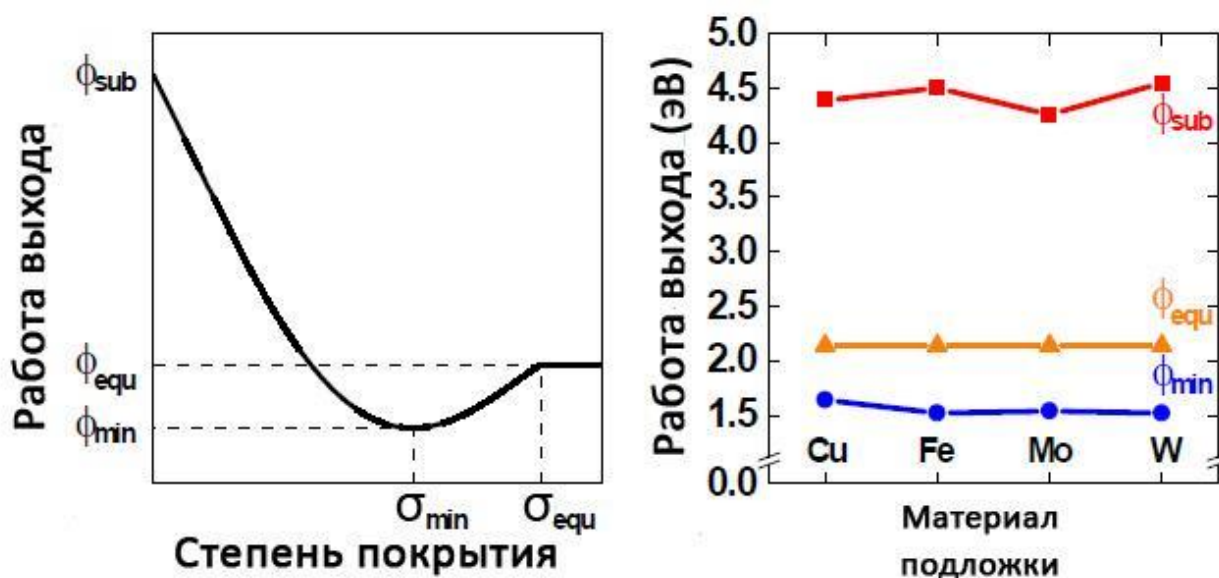


Рисунок 4. Зависимость работы выхода поверхности от степени покрытия цезием (левая диаграмма) и от материала подложки (правая диаграмма).

Десорбционный поток из неполного цезиевого слоя

Как видно из предыдущего раздела, минимум работы выхода достигается при толщине цезиевого слоя на подложке в 0,5 – 0,7 монослоев. Дальнейшее увеличение количества цезия нежелательно, так как при этом работа выхода растет. При превышении необходимой толщины слоя, его рост может быть скомпенсирован процессом десорбции атомов цезия с поверхности подложки.

Десорбционный поток Γ_{Cs} из неполного слоя на вольфрамовой подложке при температуре T сильно зависит от коэффициента покрытия σ , вычисляемого в монослоях:

$$\Gamma_{Cs} = \Gamma_0 \sigma \exp\left(\frac{-e(3,37 - 2,28\sigma)}{k_b T}\right)$$

где $\Gamma_0 = 7,5 \times 10^{26} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$. Зависимость от коэффициента покрытия является следствием отталкивающего дипольного взаимодействия между атомами слоя. Подобного рода зависимость наблюдается и для других материалов подложки. Соответствующий десорбционный поток с вольфрама для температур соответствующих температурам в ионном источнике показан на рисунке 5. Таки образом, при полном покрытии подложки цезием ожидается очень высокий десорбционный поток. При температуре образца $50 \text{ }^\circ\text{C}$ десорбционный поток $\Gamma_{Cs} > 10$ монослоев в секунду при почти полном однослойном покрытии. При достижении целого монослоя сильное дипольное отталкивание частично покрытой поверхности металла заменяется слабым Ван-дер-Ваальсовским взаимодействием между атомами цезия, которое определяет давление паров.

Из-за свойств цезия рост многослойного напыления на металлическую поверхность не происходит при комнатной температуре и низком давлении паров цезия. Однако, образование мультипольного слоя возможно при высокой плотности и интенсивности потока атомов цезия на поверхность.

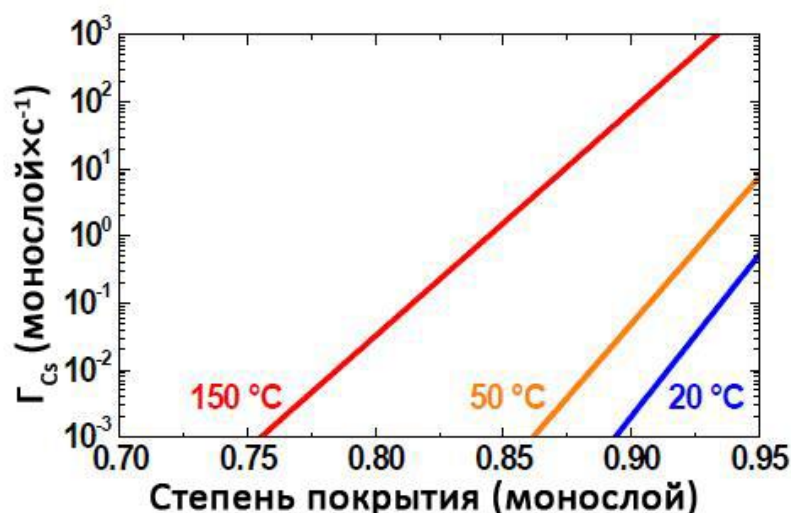


Рисунок 5. Десорбционный поток с покрытой цезием вольфрамовой подложки

Давление паров чистого цезия

Цезий является самым тяжелым из щелочных металлов, его атомный радиус составляет 265 пм, а температура плавления равняется всего 28,5 °С. Цезий имеет самую низкую энтальпию испарения ($\Delta H_f = 67,7$ кДж/моль) и самое высокое давление паров среди всех стабильных металлических элементов за исключением ртути ($\Delta H_f = 59,1$ кДж/моль). Как следствие, цезий легко инжектировать в ионный источник используя испарение. На рисунке 6 показана зависимость давления паров цезия p от температуры резервуара с жидким цезием T . Соответствующий поток на стенки Γ_{equ} в равновесном состоянии внутри закрытой системы можно рассчитать при помощи газокINETической теории, используя среднюю скорость частиц \bar{v} и плотность n цезия в газовой фазе:

$$\Gamma_{equ} = \frac{1}{4} n \bar{v} = \frac{p}{\sqrt{2\pi k_b T m_{Cs}}},$$

где m_{Cs} – масса атома цезия. В соответствии с данными представленными на рисунке 6, поток $\Gamma_{equ} = 10^{14} - 10^{15}$ с⁻¹см⁻² в системе достигается при давлении пара, которое соответствует температуре стенок источника, лежащей в интервале $T = 20$ °С – 50 °С.

Большинство представленных данных были получены при разработке светочувствительных поверхностей, в которых негативное влияние цезиевых образований подавляется использованием высокого вакуума и высокой температуры поверхности 1000 °С. Цезиевые соединения, неизбежно образующиеся в источнике отрицательных ионов при давлении $10^{-3} - 10^{-4}$ Па и температуре поверхностей 20 – 50 – 100 °С, будут оказывать значительное влияние на физические и химические процессы внутри источника.

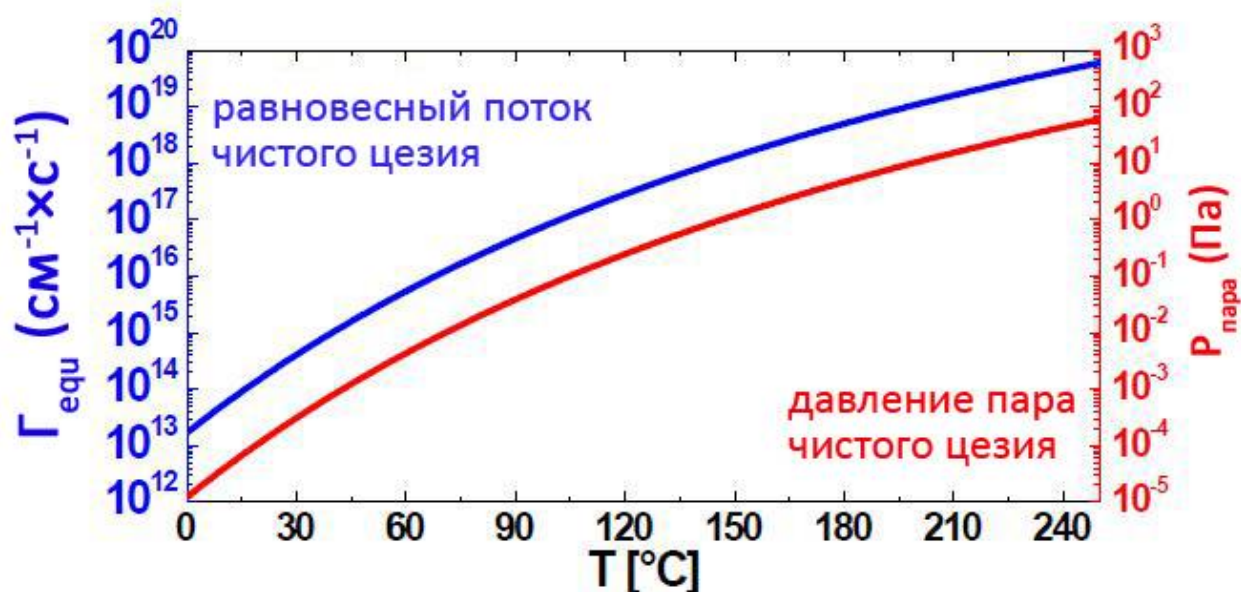


Рисунок 6. Зависимость давления паров цезия и потока на подложку от температуры.

Химические соединения цезия

После удаления одиночного электрона с 6s оболочки атом цезия принимает очень стабильную щелочную конфигурацию. Поэтому цезий является самым электроположительным из всех стабильных элементов. Из-за этого цезий имеет очень высокую химическую реактивность и образует широкий спектр кристаллических соединений, имеющих ионные связи. Из-за его высокой реактивности цезий (наряду с барием) используется в качестве гетера для поглощения частиц остаточных газов. Поток частиц примесей на внутренние стенки источника может быть приблизительно рассчитан по той же формуле, что и поток атомов цезия, учитывающей массу частиц остаточного газа. При температуре стенок 50 °С один монослой загрязняющих частиц, например H₂O или O₂, образуется на стенках в течение 3 – 4 секунд при давлении 10⁻³ – 10⁻⁴ Па. Более того, цезий может образовывать соединения с металлами, способные поглощать остаточный газ.

Цезиевые соединения имеют свойства отличные от чистого цезия. Это негативно сказывается на работе устройств, требующих определенных свойств элементарного цезия. Образование неметаллических соединений цезия также неблагоприятно для процессов перезарядки ионов на поверхности, так как увеличивает эффективную работу выхода.

Аналитическая модель формирования отрицательных ионов

Наилучшим образом процесс формирования отрицательных ионов на поверхности с низкой работой выхода описывает модель предложенная Норсковым и Лундквистом⁵. В сочетании с Томпсоновской моделью углового и энергетического распределения частиц модель Норскова-Лундквиста дает результаты, которые хорошо соотносятся с экспериментальными данными по поверхностной конверсии положительных ионов в отрицательные. Эта модель наглядно иллюстрирует, как эффективность образования отрицательных ионов зависит от поверхностного покрытия подложки щелочными металлами.

Если не учитывать отдельные столкновительные процессы между атомами поверхности и атомами пучка, которые вносят ощутимый вклад только при высокой плотности пучка положительных ионов и при условии образования мультипольного слоя щелочного металла, то ток отрицательных ионов I^- можно выразить следующим образом:

$$I^- = 2\pi I^+(E_1) S(E_1, \theta_i) \int_{V_i}^{E_1} \int_0^{\pi/2} P^-(E_2, \theta) f(E_2, \theta) \sin \theta d\theta dE_2 .$$

В этом уравнении I^+ – это ток положительных ионов с энергией E_1 , $S(E_1, \theta_i)$ – коэффициент распыления подложки частицей с энергией E_1 , падающей под углом θ_i к

нормали поверхности, $f(E_2, \theta)$ – функция распределения нейтральных атомов, а $P^-(E_2, \theta_i)$ – это вероятность образования отрицательного иона, вылетающего с поверхности с энергией E_2 под углом θ к нормали. Пределы интегрирования выбраны следующие: V_i – это потенциал поля зеркального изображения заряда, индуцированного вылетающим отрицательным ионом, E' – это максимальная энергия, которую налетающая частица с энергией E_1 и массой M_1 может передать атому с массой M_2 . E' можно выразить соотношением $E' = \frac{3M_1M_2}{(M_1 + M_2)^2} E_1$.

В модели Норскова-Лундквиста вероятность эмиссии положительных $P^+(v_\perp)$ и отрицательных $P^-(v_\perp)$ ионов представляется как функция перпендикулярной к поверхности компоненты скорости вылетающих частиц. Вероятность формирования отрицательных ионов может быть выражена формулой:

$$P^-(E_2, \theta) = \frac{2}{\pi} e^{-\beta \sqrt{M_2} [\varphi(\sigma) - E_A + V_i] / \sqrt{2E_2} \cos \theta},$$

где φ – работа выхода поверхности (φ зависит от толщины пленки щелочного металла σ), E_A – сродство к электрону атомов щелочного металла и массой M_2 , V_i – это потенциал поля зеркального изображения заряда, индуцированного вылетающим отрицательным ионом, θ – полярный угол вылета частиц по отношению к нормали, β – константа, определяемая экспериментально. В этом выражении $\sqrt{2E_2/M_2} \cos \theta = v_\perp$, перпендикулярная компонента скорости вылетающих частиц.

Аналитическая модель зависимости работы выхода от толщины покрытия

Полуэмпирическое выражение полученное Г. Д. Алтоном⁴ описывает зависимость между работой выхода поверхности φ и степенью покрытия поверхности σ электроположительным веществом. Это простое аналитическое выражение с хорошей точностью соотносится с экспериментальными данными и позволяет рассчитать работу выхода поверхности покрытой атомами щелочного металла. Выражение с хорошей точностью можно использовать для значений коэффициента покрытия в интервале от $\sigma = 0$ (чистая поверхность) до $\sigma = 1$ (1 монослой). Уравнение, описывающее зависимость φ от σ , можно записать следующим образом:

$$\varphi(\sigma) \approx \varphi_0 + \frac{6\Delta\varphi_m}{(3 - \sigma_m)\sigma_m} \sigma - \frac{3\Delta\varphi_m(\sigma_m + 1)}{(3 - \sigma_m)\sigma_m^2} \sigma + \frac{2\Delta\varphi_m}{(3 - \sigma_m)\sigma_m^2} \sigma^3 [B],$$

где φ_0 – работа выхода чистой поверхности при $\sigma = 0$, а $\Delta\varphi_m$ – максимально возможное изменение работы выхода, достигаемое при соответствующей толщине покрытия $\sigma = \sigma_m$. Выражение для максимального изменения работы выхода $\Delta\varphi_m$ можно записать следующим образом:

$$\Delta\varphi_m \approx -1,24 \left[\varphi_0 - \frac{1}{2} (I_A + E_A) \right] [B].$$

В этом выражении использованы следующие обозначения: I_A – первый потенциал ионизации, E_A – электронное сродство адсорбированного вещества. Выражение для максимального изменения работы выхода хорошо согласуется с экспериментальными данными для всех исследованных щелочных металлов.

На рисунке 7 показана зависимость эффективности перезарядки ионов Ne^+ на покрытой цезием молибденовой подложке от толщины цезиевого слоя, построенная по описанным моделям Норскова-Лундквиста и Алтона. Интегрирование по энергии выполнялось в пределах от $V_i = 1,4$ эВ до $E' = 30$ эВ, сродство к электрону цезия $E_A = 1$ эВ, работа выхода чистой поверхности $\varphi_0 = 4,27$ эВ, пределы интегрирования по углу $0 \leq \theta \leq \pi/2$. Работа выхода поверхности рассчитывалась по модели Алтона.

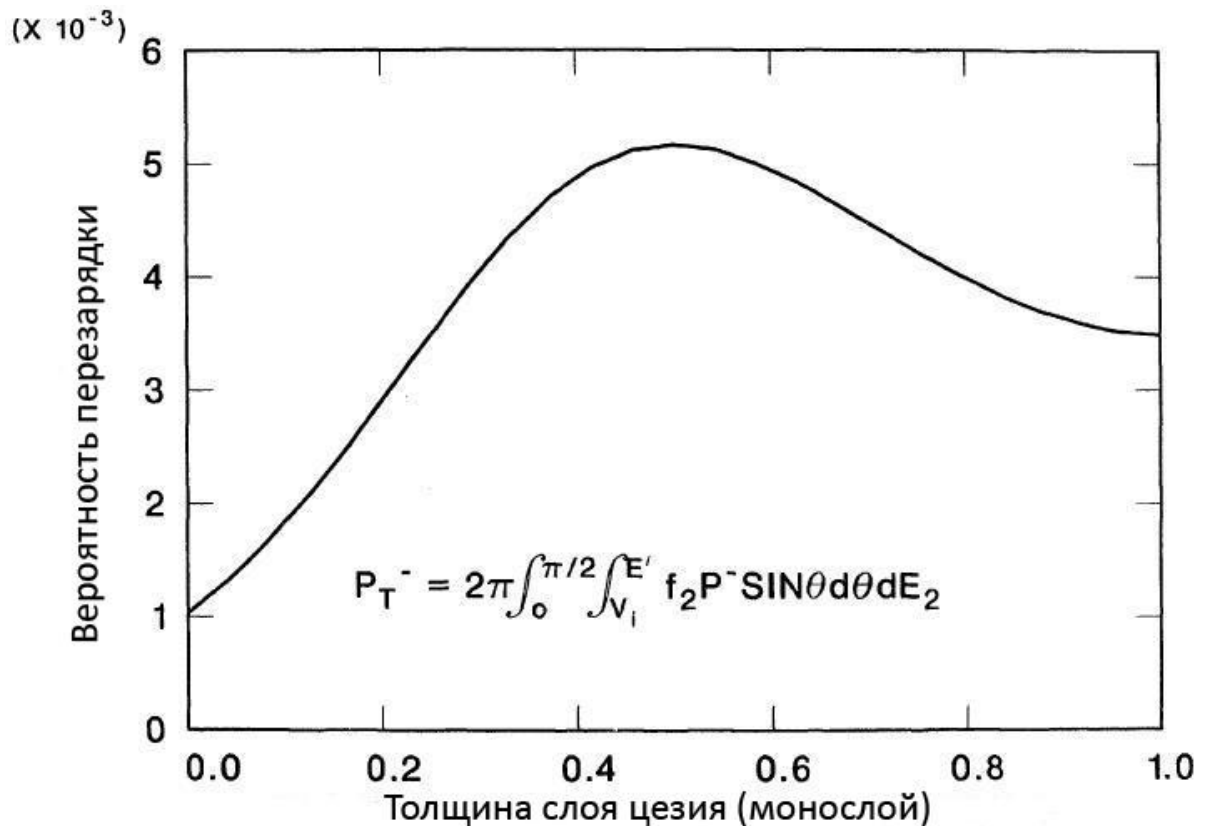


Рисунок 7. Зависимость эффективности перезарядки ионов Ne^+ на покрытой цезием молибденовой подложке от толщины цезиевого слоя, полученная по модели Норскова-Лундквиста.

Система цезирования

Из предыдущей главы следует, что напыление тонкого слоя цезия на сетку ионно-оптической системы значительно повышает эффективность работы источника отрицательных ионов. Это связано с тем, что работа выхода поверхности уменьшается за счет взаимодействия атомов подложки и щелочного металла. Практические результаты, полученные при разработке источников отрицательных ионов поверхностно-плазменного типа, подтверждают улучшение эффективности перезарядки положительных ионов при инжекции цезия. В частности, результаты, которые были получены на источнике разработанном в ИЯФ им. Будкера для установки LHD, позволяют говорить о том, что эффективность генерации отрицательных ионов на покрытой цезием поверхности до 4 – 5 раз превышает эффективность генерации на чистой поверхности (рис. 8).

При этом цезиевый слой разрушается под воздействием различных процессов во время работы источника. Следовательно, необходима система, которая позволила бы напылять цезий во время работы. Процесс инжекции цезия в различных источниках может быть импульсным или непрерывным, а выбор обычно определяется необходимым режимом работы источника и его конструктивными особенностями.

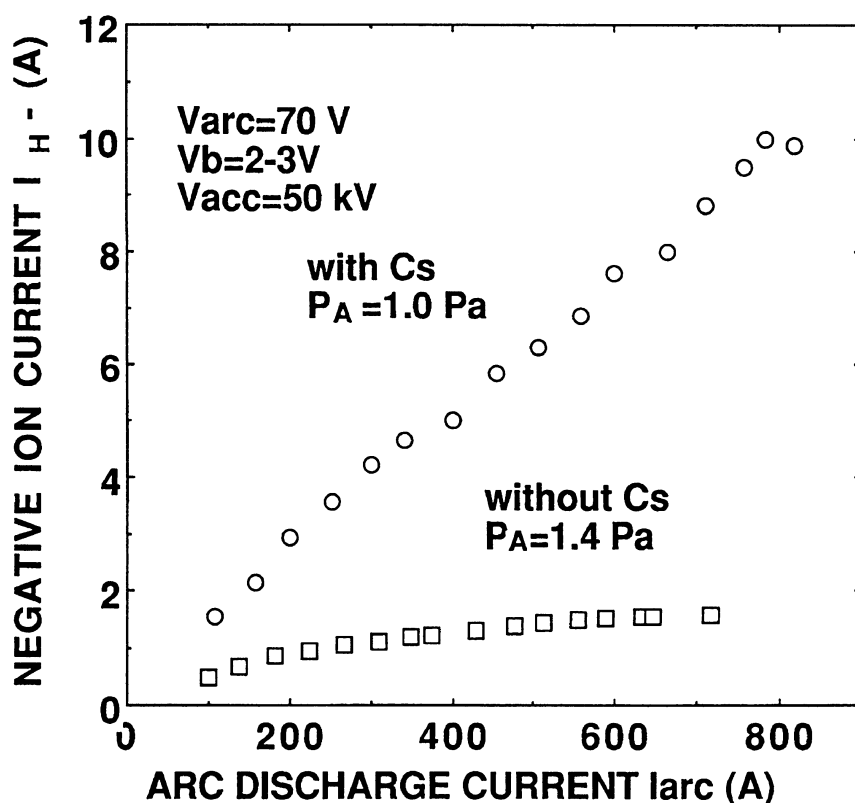


Рисунок 8. Сравнение зависимостей тока отрицательных ионов от тока разряда для двух режимов работы действующего источника: с инжекцией цезия и без нее.

Типичная система инъекции, работающая на металлическом цезии, имеет два основных элемента, имеющих индивидуальные системы контроля температуры: печка, в которую помещается контейнер с жидким цезием, и длинный паропровод с инъекционным соплом на конце (рис. 9). При нагреве печки помещенный в нее чистый металлический цезий, начинает испаряться, и образуется поток цезия в камеру источника через паропровод. Интенсивность испарения зависит от температуры печки, следовательно, именно она в первую очередь определяет цезиевый поток. Стенки паропровода должны быть нагреты до температуры не ниже температуры печки, так как в противном случае, на них будет происходить конденсация цезия. Однако это свойство также может быть использовано для управления интенсивностью потока. Вакуумный клапан позволяет изолировать объем печки от камеры источника, что обеспечивает возможность заправлять печку цезием без нарушения вакуума в камере, а значит без остановки работы источника.

При инъекции цезия в одной точке камеры источника он осаждается не только на сетке ИОС, но и в большом количестве на боковых стенках камеры. Во время непосредственной работы источника стенки камеры нагреваются за счет взаимодействия с плазмой, и десорбция цезия накопившегося на них возрастает. За счет этого процесса осажденный на стенках цезий перераспределяется, и часть его все же попадает на сетку, однако значительная часть теряется. Существует еще один серьезный недостаток инъекции в одной точке. Такой метод хорошо подходит для источников имеющих небольшие размеры. Однако в источниках с большой вакуумной камерой и с большой площадью сетки ИОС подобная схема не обеспечивает необходимой однородности нанесения цезия на всю площадь поверхности сетки.

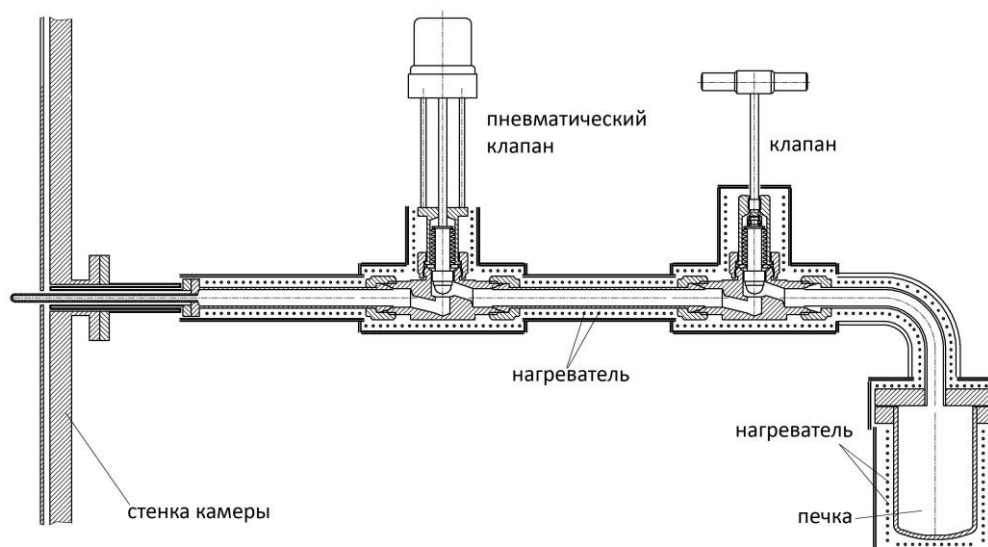


Рисунок 9. Схема типичной системы цезирования.

Так как с развитием физики УТС установки приобретают все большие размеры, и, соответственно, увеличиваются размеры инжекторов, устранение описанных недостатков является очень актуальной задачей на сегодняшний день. Одним из возможных решений проблемы неоднородного нанесения цезия на сетку может быть параллельное использование нескольких систем цезирования, обеспечивающее инжекцию в нескольких точках камеры. Но при таком подходе конструкция источника становится значительно более сложной, так как каждая система требует нескольких систем контроля температуры. Это приводит к увеличению стоимости источника, а также усложняет управление процессом цезирования. Другим решением является использование систем цезирования с галереей раздачи. Данное направление в конструировании источников отрицательных ионов только начинает развиваться и активно исследуется в различных институтах, занимающихся разработкой источников. В связи с этим при разработке системы с галереей раздачи возникает множество вопросов и, в первую очередь, конструктивных сложностей, которые необходимо решить.

Галерея раздачи

Галерея раздачи представляет собой часть паропровода, особым образом располагающуюся внутри вакуумной камеры источника, эта часть имеет отверстия в стенках, через которые происходит инжекция цезия. Этот элемент позволяет концентрировать пары цезия в необходимой области источника, тем самым снижая потери на боковых стенках и значительно улучшая однородность напыления на сетку ИОС. На рисунке 10 представлена модель галереи раздачи и ее расположение в камере источника. Разрабатываемая система цезирования состоит из двух одинаковых частей, каждая из которых имеет свою печку и галерею раздачи изогнутую в виде половины кольца. Вместе две галереи раздачи составляют трубку, кольцом опоясывающую сетку. Форма кольца выбрана из-за круглой формы сетки ионно-оптической системы. По всей длине галереи раздачи на боковой поверхности имеются маленькие по сравнению с диаметром трубки отверстия направленные к центру тора, через эти отверстия и происходит инжекция паров цезия. Равномерно распределенный поток пара из всех отверстий обеспечивает однородность напыления цезия на сетку.

Разрабатываемая система позволяет концентрированно и равномерно напылять цезий на сетку ионно-оптической системы, используя всего две печки и два паропровода для ввода паров в камеру. Однако не исключается возможность создания галереи раздачи в форме целого кольца, что позволит использовать всего одну печку, а значит, еще сильнее упростит всю систему цезирования.

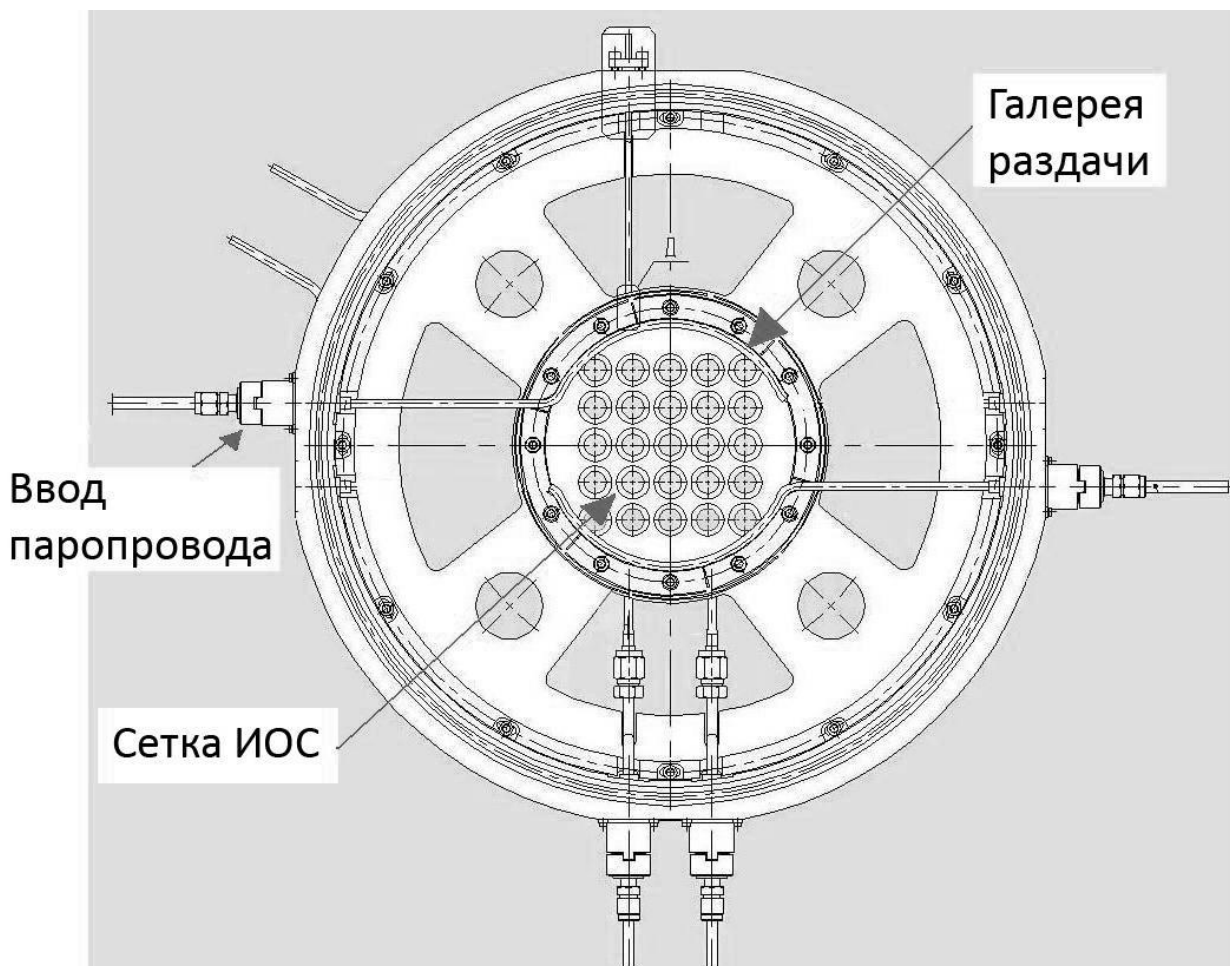


Рисунок 10. Модель галереи раздачи и ее расположение в камере источника.

Конструктивные особенности разработанной системы цезирования

Как уже отмечалось ранее, разработка системы цезирования с галереей раздачи сопряжена с различными конструктивными сложностями. Одной из конструктивных особенностей разработанной системы является способ нагрева паропровода и галереи раздачи. Обычно паропровод имеет двойные стенки, между которыми намотан кабель для нагрева (см. на рисунке 9). Кабель нагревается омическим способом и в свою очередь нагревает стенки паропровода. Но такой метод нагрева не подходит для системы с галереей раздачи по той причине, что большая часть паропровода расположена в вакууме, а галерея раздачи, которая является частью паропровода, имеет отверстия в стенках. Следовательно, между кабелем нагрева и стенками паропровода возникает вакуумная прослойка, и теплообмен между ними значительно ухудшается. Для улучшения теплообмена можно было бы сделать паропровод с одинарной стенкой и приварить нагревательный кабель к ней. Но, если учесть, что длина одной только галереи раздачи более 200 мм, а диаметр 6 мм, то подобный метод является слишком сложным. К тому же

в условиях эксперимента, когда размеры, количество и месторасположение отверстий меняются, приваривание нагревного кабеля к стенкам галереи может затормозить исследование.

Для того чтобы избежать описанных сложностей было решено испытать в разрабатываемой системе цезирования другой принцип нагрева паропровода: стенки паропровода нагреваются излучением кабеля диаметром 1,5 мм протянутого внутри паропровода по всей его длине. А при наличии потока цезия в паропроводе его атомы также участвуют в передаче тепла от кабеля. Такой метод, конечно, имеет свои недостатки. Одним из них является то, что при наличии кабеля внутри паропровода клапан не может герметично закрыться. Поэтому кабель вводится в паропровод после клапана, а часть паропровода расположенная на воздухе нагревается внешними нагревателями и для более эффективного нагрева помещена в теплоизолирующую коробку. На рисунке 11 приведена фотография внешней части паропровода расположенной в коробке.

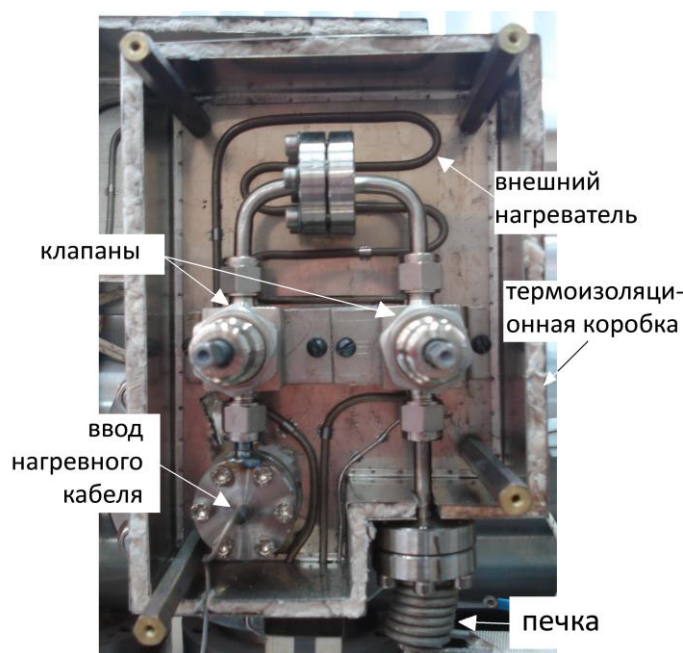


Рисунок 11. Фотография внешней части системы цезирования.

В ходе стендовых работ обнаружилось еще одно слабое место в спроектированной системе цезирования. В месте ввода паропровода в вакуумную камеру из-за теплового контакта с фланцем паропровод имеет недостаточно высокую температуру. Мощности нагревного кабеля внутри паропровода не достаточно для компенсации возникающих потерь тепла. В результате в этом сегменте паропровода возникает холодная точка системы, то есть пары цезия конденсируются и не проходят дальше. Для того чтобы устранить эту холодную точку, необходимо использовать дополнительный нагрев. Для этого на небольшой участок трубки паропровода вблизи фланца со стороны атмосферы

намотан нагревный кабель, который компенсирует потери тепла. Также для уменьшения потерь тепла во фланце сделана проточка, то есть толщина фланца сделана меньшей, чем толщина стенок вакуумной камеры (рис. 12). В дальнейшем планируется сделать область проточки гофрированной, что позволит еще сильнее снизить потери тепла паропровода.

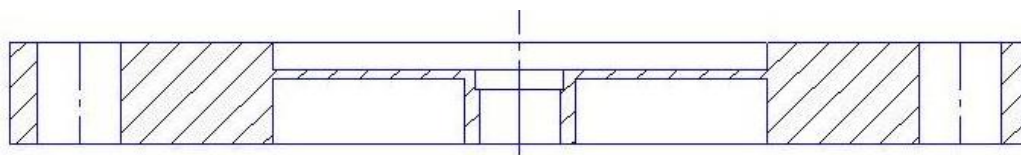


Рисунок 12. Фланец, имеющий проточку для уменьшения теплопроводности, в разрезе.

Схема эксперимента

Проведенные стендовые работы, были направлены на разрешение вопросов, возникших в процессе проектирования инжектора. Необходимо было создать надежную систему, позволяющую вводить пары цезия в вакуумную камеру со стороны атмосферы. Стояла задача сконструировать удобную систему, включающую в себя цезиевый испаритель, паропровод на воздухе и в вакууме, элементы концентрации паров в вакууме, позволяющие добиться равномерного распределения цезия по всей поверхности плазменной решетки.

Основное внимание в ходе эксперимента уделялось изучению влияния размеров отверстий на однородность распределения подачи цезия через галерею раздачи. Помимо этого изучалось, как влияет на распределение, температура различных элементов системы, таких как печка и галерея раздачи. Необходимо было найти температурные параметры, при которых подача цезия была бы однородна вдоль всей длины галереи.

Схема эксперимента представлена на рисунке 13. В вакуумной камере расположена галерея раздачи, соединенная с системой ввода паров цезия в вакуум со стороны атмосферы. В начале работ, пока система ввода паров со стороны атмосферы еще не была готова, исследования проводились на таблетках бихромата цезия, печка с которым размещалась прямо в вакуумной камере. Для замены цезиевых таблеток приходилось каждый раз вскрывать вакуумную камеру, что причиняло определенные неудобства. По этой же причине ввод нагревного кабеля осуществлялся непосредственно в галерею раздачи прямо в вакууме. Когда система инжекции была завершена, эксперимент проводился на чистом металлическом цезии.

Для проведения эксперимента был создан макет распределительной галереи раздачи представленный на фотографии на рисунке 14. Галерея раздачи представляет собой трубку изогнутую в форме полукольца, диаметр трубки 6 мм, длина около 250 мм (диаметр кольца 150 мм). На первом этапе эксперимента было решено проводить

исследования для галереи раздачи с тремя отверстиями расположенными на равном расстоянии друг от друга: вблизи входного торца трубки, посередине и около дальнего торца. Диаметры отверстий в ходе эксперимента изменялись от 0,3 мм до 1,5 мм

Относительная величина потока цезия из отверстий производилась при помощи подвижного поверхностно ионизационного зонда, который может двигаться вдоль галереи раздачи по всей ее длине. Подробнее зонд описывается дальше. Для измерения температур использовались термопары типа хромель-алюмель и хромель-копель.

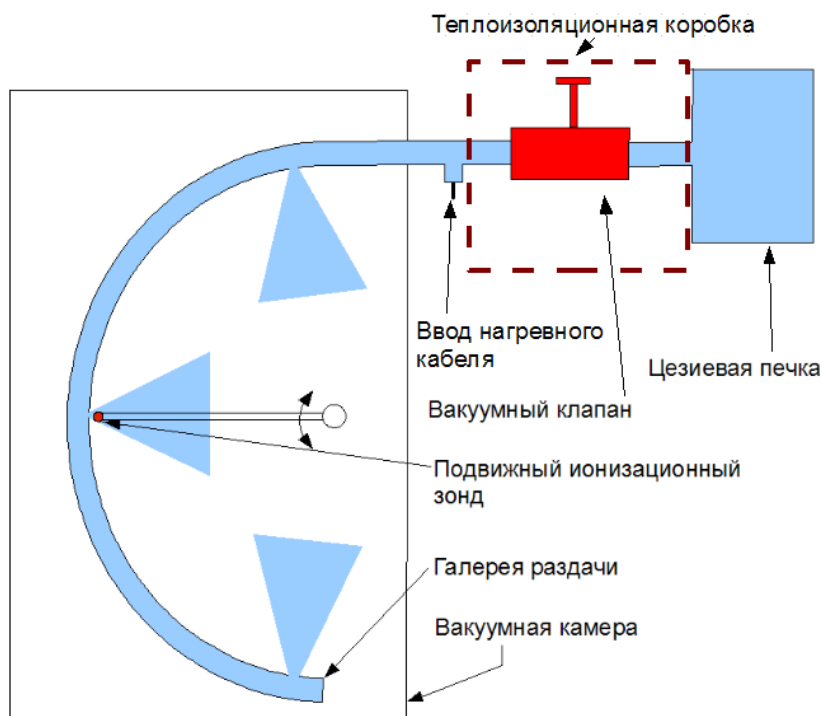


Рисунок 13. Схема эксперимента.

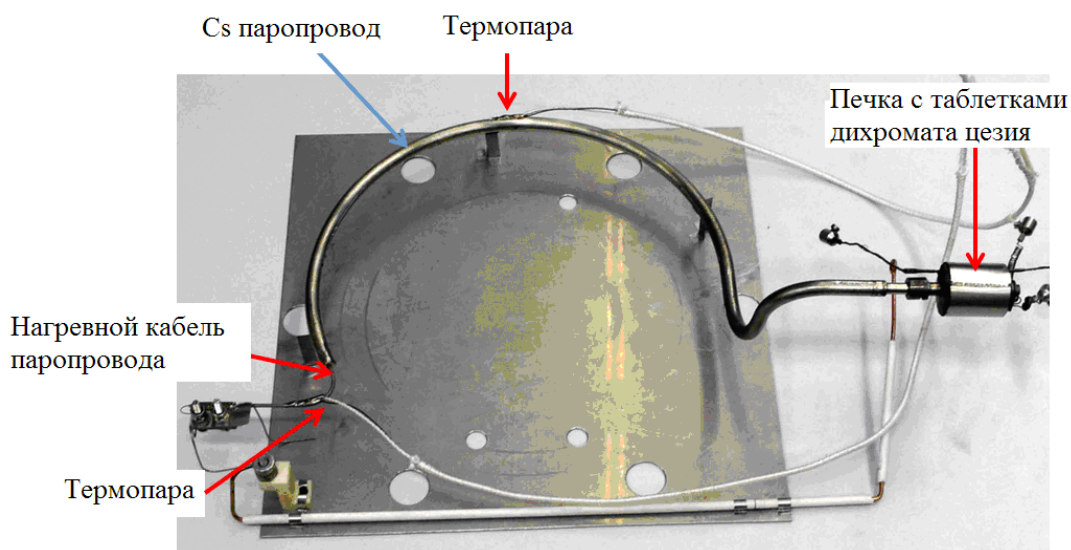


Рисунок 14. Фотография макета галереи раздачи с печкой на таблетках бихромата цезия.



Рисунок 15. Источники цезия: слева – таблетки бихромата цезия, справа – ампула с чистым металлическим цезием.

Источники цезия

Бихромат цезия. Бихромат цезия представляет собой твердые таблетки, каждая таблетка содержит около 1 мг цезия (рис. 15, слева). Основным достоинством таблеток является то, что цезий в таком виде не вступает в реакцию с кислородом, поэтому такие таблетки могут загружаться в печь при атмосферном давлении. Однако имеется существенный недостаток по сравнению с чистым металлическим цезием, для получения необходимого давления таблетки необходимо нагреть до температуры в 3 – 4 раза больше.

Чистый металлический цезий. Помимо очевидного преимущества в зависимости скорости испарения от температуры чистый цезий имеет один существенный недостаток. Из-за своей химической активности он интенсивно взаимодействует с атмосферой, при одновременной реакции нескольких грамм может даже произойти взрыв. Поэтому чистый цезий транспортируется в запаянных стеклянных ампулах (рис. 15, справа). Эти ампулы загружаются в камеру печи и, только после того как атмосфера откачана, разламываются, тем самым высвобождая цезий.

Поверхностно ионизационный зонд

Для исследования был разработан и протестирован поверхностно ионизационный зонд, называемый также зондом Ленгмюра-Тейлора. Такой зонд позволяет точно измерять атомные столкновения в вакуумной среде.

Принцип работы зонда основан на процессе поверхностной ионизации. Этот процесс имеет высокую вероятность для тех атомов, которые в основном состоянии имеют низкий потенциал ионизации. Поэтому такой зонд используется, в основном, при работе со щелочными металлами, к которым относятся цезий.

Горячая нить накала, сделанная из материала с большой работой выхода (тантал), располагается прямо в потоке цезия. Атомы цезия, прилипающие к нити накала на короткое время, подвергаются процессу поверхностной ионизации и вылетают с нити уже

как ионы цезия. Смещающее напряжение используется для того, чтобы собирать ионы цезия на коллекторе катода. Измеряемый ток между нитью накала и коллектором может достигать нескольких мкА.

Ионизационный зонд позволяет детектировать число атомов в секунду в потоке цезия. Детектируемый ток сильно зависит от состояния поверхности ионизирующей нити накала. Поверхностная ионизация цезия происходит только в том случае, если ионизационный потенциал атомов Φ_{Ion} сравним с работой выхода φ танталовой нити накала при температуре T . Атомы вылетают с поверхности нити накала в виде положительных ионов Cs^+ с вероятностью P^+ и в виде нейтральных атомов с вероятностью $1 - P^+$. Вероятность P^+ определяется по закону Саха-Ленгмюра:

$$P^+ = \frac{1}{1 + \frac{g^0}{g^+} \exp\left(\frac{\Phi_{\text{Ion}} - \varphi}{k_b T}\right)},$$

где g^0 и g^+ - статистические веса для нейтральных атомов и для ионов соответственно.

При температурах ниже 1000°C на нити накала образуется слой цезия, уменьшающий работу выхода, а время пребывания атомов цезия на нити может достигать нескольких секунд. Это приводит к уменьшению вероятности ионизации. Нагрев нити накала до 1300°C важен для уменьшения времени пребывания до значений порядка $0,01$ с, что позволяет сохранять поверхность чистой. Тем самым сохраняется высокая работа выхода, и достигается большое значение коэффициента ионизации. Таким путем обеспечивается надежная и воспроизводимая работа зонда. Поверхностно ионизационный зонд является отличным средством для измерения интенсивных потоков цезия в течение длительного времени, потому что абсорбированный цезий испаряется нагретой поверхностью за короткое время. Тем не менее, ионизационный зонд не подходит для ситуаций, в которых измерения чувствительны к температуре, например для измерений десорбционного потока цезия с покрытой им металлической поверхности. Тепловое излучение горячей нити накала будет влиять на измеряемый поток.

Другим недостатком поверхностно ионизационного зонда является то, что он позволяет измерять лишь относительную величину потока. Для измерений абсолютной величины необходима калибровка с использованием дополнительных средств. Однако в настоящем исследовании абсолютная величина не является важной, поэтому поверхностно ионизационный зонд идеально подходит для измерений величины потока из отверстий.

Результаты эксперимента

Зависимость распределения выхода цезия от размеров отверстий

В ходе эксперимента были исследованы характеристики струек паров цезия, выходящих из галереи раздачи при различных диаметрах отверстий и в зависимости от расстояния от входа в галерею (рис. 16). Было проведено три серии измерений для трех конфигураций с различными диаметрами отверстий. Так как каких-либо теоретических или практических данных о необходимом размере отверстий не было, начальный диаметр был выбран произвольно и составлял 0,9 мм для всех трех отверстий. Распределение при такой конфигурации оказалось неоднородным и, отталкиваясь от полученных результатов, в новой серии измерений диаметры второго и третьего отверстий были изменены так, чтобы скомпенсировать неоднородность. Как следствие распределение потоков стало более однородным (средний график на рисунке 16), однако, не идеальным. Тогда было решено уменьшить диаметры всех отверстий до 0,3 мм и исследовать равномерность при такой конфигурации. Результаты показали, что для трех отверстий диаметром 0,3 мм достигается хорошая однородность.

Отверстия диаметром 0,3 мм станут основой для галереи с большим числом отверстий, однако, очевидно, что при изменении числа отверстий однородность распределения будет ухудшаться. И здесь будут полезны результаты первых двух серий исследования, наглядно демонстрирующие, как за счет изменения отверстий можно влиять на однородность распределения подачи цезия.

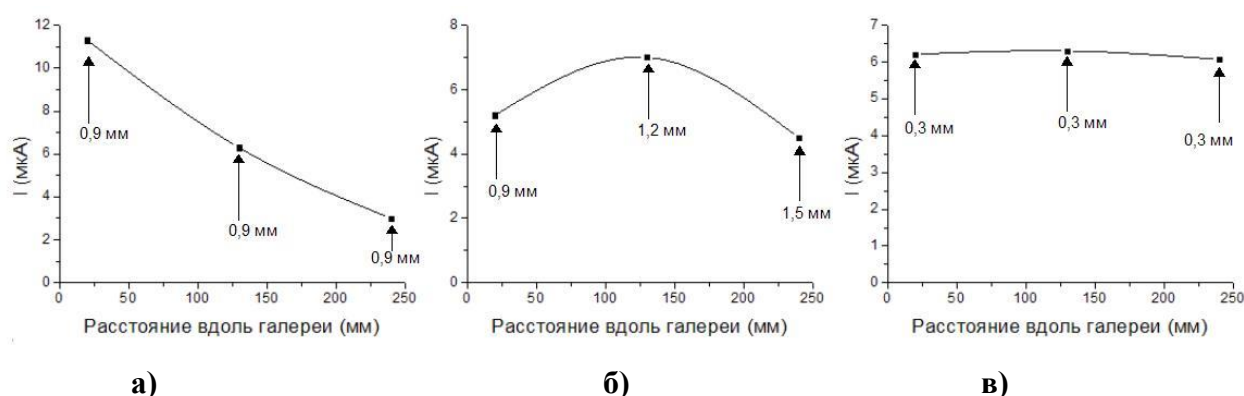


Рисунок 16. Распределение выхода цезия из трех отверстий при различных диаметрах: **а)** три отверстия 0,9 мм; **б)** первое - 0,9 мм, второе - 1,2 мм, третье - 1,5 мм; **в)** три отверстия 0,3 мм. Отверстия расположены на расстоянии 20, 130, 240 мм от начала галереи.

Также были исследованы профили потоков цезия из разных отверстий и определены значения полуширины пика на полувысоте (рисунки 17, 18, 19). В большинстве случаев наблюдается четко выраженная струя. Из полученных результатов можно сделать вполне ожидаемый вывод, что чем больше диаметр отверстий, тем шире струя. К сожалению, профили струй для отверстий диаметром 0,3 мм были получены при помощи зонда с другой геометрией, поэтому сравнение этих результатов с результатами для других размеров отверстий не совсем корректно.

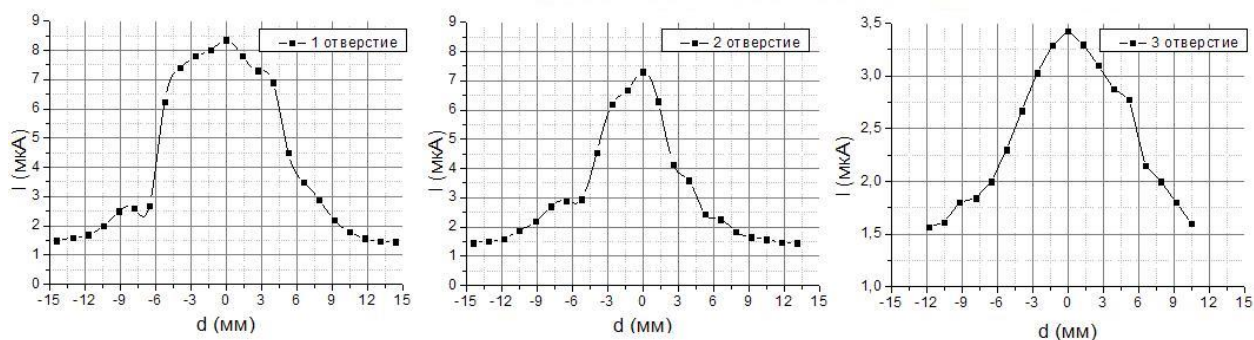


Рисунок 17. Профили потоков цезия для конфигурации с диаметром отверстий 0,9 мм. Соответствующие значения полуширины пика на полувысоте: 11 мм, 9 мм, 9 мм.

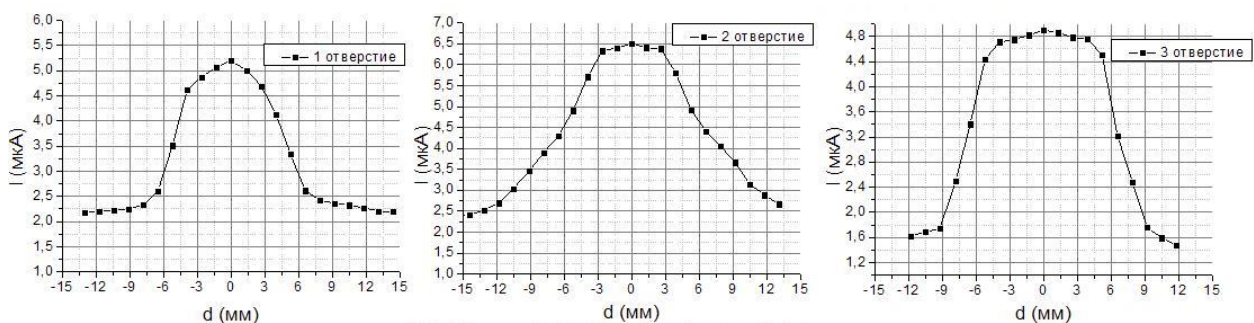


Рисунок 18. Профили потоков цезия для конфигурации с диаметром отверстий 0,9 мм, 1,2 мм, 1,5 мм. Соответствующие значения полуширины пика на полувысоте: 10 мм, 12,5 мм, 13,5 мм.

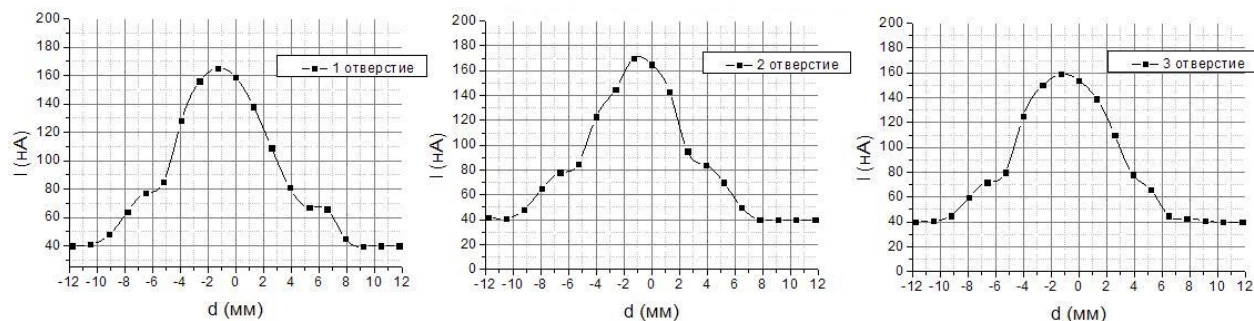


Рисунок 19. Профили потоков цезия для конфигурации с диаметром отверстий 0,3 мм. Соответствующие значения полуширины пика на полувысоте: 8 мм, 8 мм, 8 мм.

Влияние на распределение выхода цезия температуры галереи

Также в ходе эксперимента было исследовано влияние на распределение выхода цезия температуры паропровода и галереи. На рисунке 20 представлены основные результаты, опираясь на которые можно сделать вывод, что для достижения равномерного выхода рабочая температура паропровода и галереи должна быть не ниже 260°C .

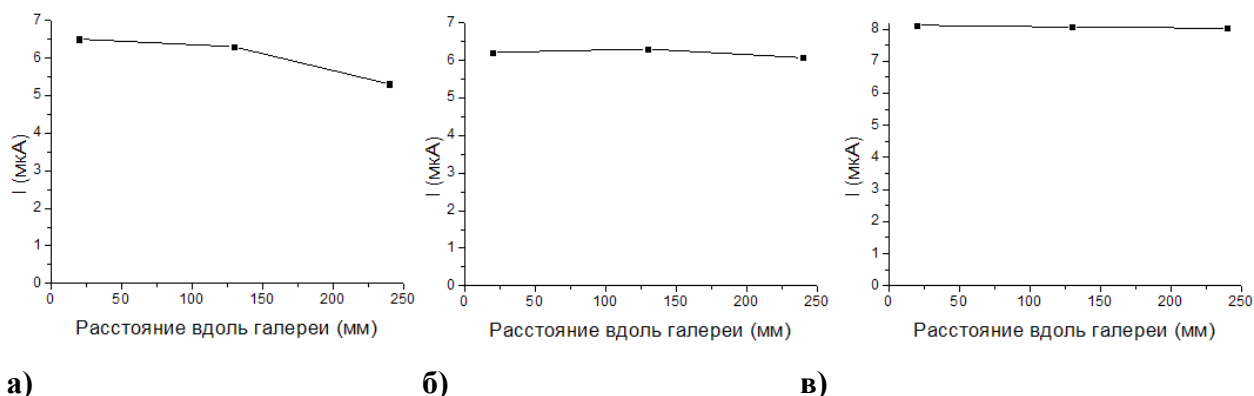


Рисунок 20. Распределение выхода цезия из трех отверстий диаметром 0,3 мм при различной температуре паропровода: **а)** 250°C , **б)** 260°C , **в)** 300°C .

Временные характеристики подачи цезия

Немаловажными при работе источника являются временные характеристики подачи цезия, такие как время выхода на рабочий режим, а также время истечения остатков цезия из паропровода после закрытия печки. На левой диаграмме рисунка 21 представлена зависимость тока цезия из первого отверстия от времени, нулевой момент соответствует времени выхода температуры на постоянное значение. Для сравнения на графике приведены зависимости для температуры печки 165°C и 200°C . Видно, что чем больше температура печки, тем быстрее поток выходит на стационар. Это свойство можно выгодно использовать для сокращения времени выхода системы цезирования на рабочий режим, если тонко отработать изменение температуры во время этого процесса.

На правой диаграмме рисунка 21 диаграмма, отображающая зависимость потока цезия из первого отверстия после закрытия клапана, соединяющего паропровод с печкой, то есть после остановки подачи цезия. Эта диаграмма соответствует наблюдениям сделанным во время эксперимента: управление скоростью инъекции цезия при помощи изменения температуры печки эффективно только на длительных временных отрезках. Следовательно, для улучшения времени отклика системы необходимо для управления скоростью инъекции использовать температуру не только печки, но и паропровода.

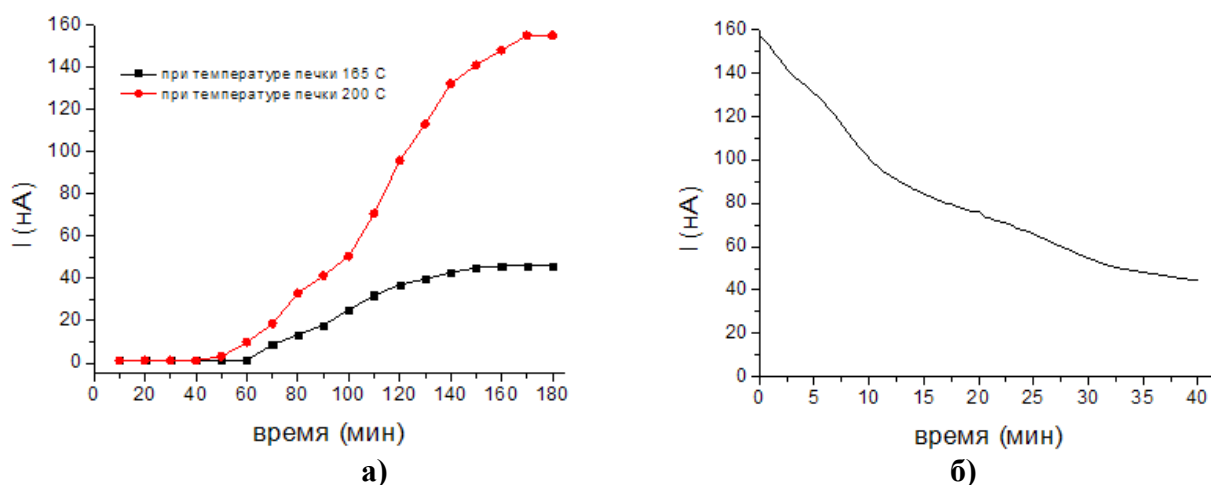


Рисунок 21. а) Выход потока цезия на стационар в начале работы для различной температуры печи. Нулевой момент времени соответствует моменту достижения температуры печи рабочего значения. б) Истечение цезия из паропровода и галереи после закрытия клапана, отсекающего печь от паропровода.

Необходимые параметры источников питания

Также к важным результатам эксперимента можно отнести определение мощности источников питания для каждого элемента системы. На основе этих данных будет разработан блок питания, предназначенный для разрабатываемой системы цезирования.

	рабочая температура, °C	P, Вт	U, В	I, А	постоянный/переменный
печка	200	7,4	4,6	1,6	пост.
кабель для нагрева паропровода	260	18,2	15,2	1,2	перем.
коробка	250	31,5	13,7	2,3	перем.
спираль для дополнительного нагрева на воздухе	250	18,4	12,1	1,52	пост.

Таблица 1. Параметры источников питания для нагрева различных элементов системы цезирования и соответствующие температуры.

Основные погрешности измерений

Основной вклад в погрешность измерения интенсивности потока из отверстия вносит точность позиционирования зонда. Зонд позиционируется с точностью 1° , что соответствует примерно 1,5 мм. Если соотнести это значение с профилями потоков, то можно сделать вывод, что погрешность определения максимального значения тока не превышает 10%

При измерении температур следует учитывать, что все они измеряются относительно корпуса вакуумной камеры. Горячая галерея раздачи, паропровод, печь нагревают стенки

камеры. Исследования в первых двух сериях проводились на бихромате цезия. Цезиевая печка, находящаяся внутри камеры, нагревалась до температуры почти $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, и вносила наибольший вклад в нагрев камеры. На первой диаграмме рисунка 22 показано, как изменяются показания температуры паропровода при увеличении температуры печи. Исходя из этой диаграммы, можно оценить размер поправки, которую необходимо добавить к измеренным температурам помимо учета комнатной температуры. На второй диаграмме показана зависимость величины поправки от температуры печи.

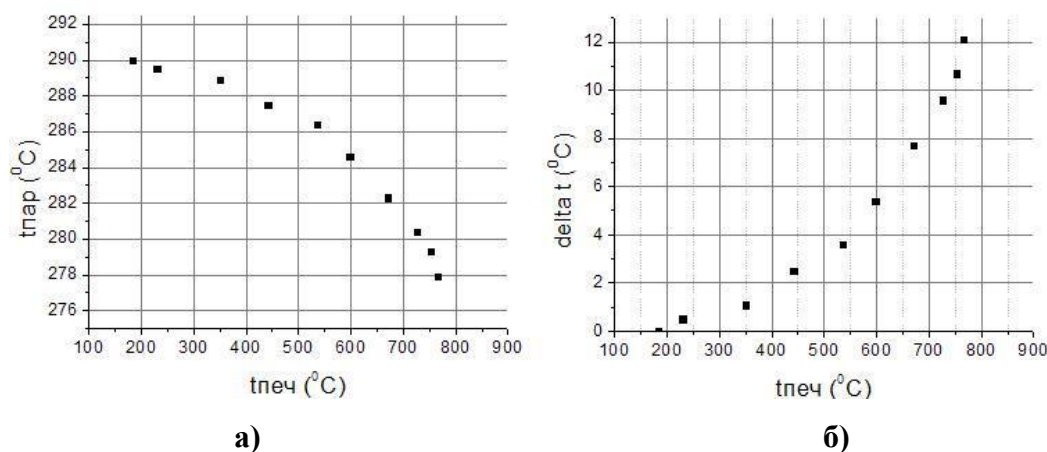


Рисунок 22. а) Зависимость показаний температуры паропровода от температуры печи. б) зависимость величины поправки к значениям измеряемых температур от температуры печи.

Моделирование в CreatVac

Было интересно и полезно попробовать смоделировать выход паров цезия из галереи раздачи. Из доступных средств моделирования, единственным, которое могло бы подойти, являлась программа CreatVac.

Данная программа разрабатывалась для расчета вакуумных систем. В ее основе лежит метод пробных частиц. Трехмерная модель объекта описывается поверхностями. В определенной области модели задается источник частиц. Далее идет моделирование движения этих частиц с учетом их взаимного столкновения и столкновения со стенками. Выходные данные описывают, какое количество частиц попало на каждую из поверхностей, исходя из этих данных, можно рассчитать, какое давление оказывается на каждую поверхность.

Существует два режима моделирования. Первый - параллельный. В этом случае задается начальное число частиц, а длительность моделирования задается числом соударений. Второй режим можно назвать пошаговым. В этом режиме задается число частиц, которое будет инжектироваться источником на каждом шаге, а длительность моделирования задается числом и продолжительностью шагов.

Программа позволяет задать различные параметры частиц: массу, энергию, распределение по скоростям (изотропное или максвеловское), профиль вылета (изотропный или косинусоидальный), также можно задать параметры отражения частиц от поверхности: распределение по скоростям и профиль вылета.

Также, для каждой поверхности можно задать сорбционный коэффициент. Он может принимать значения от 0 до 1, поверхность с коэффициентом сорбции равным 1 соответствует отверстию.

Результаты моделирования

Представленные результаты относятся к конфигурации галереи раздачи с тремя отверстиями диаметром 0,3 мм каждое. Коэффициент сорбции трех поверхностей, соответствующих отверстиям равен единице, остальных – нулю.

Предпочтение было отдано пошаговому режиму, так как в реальности идет непрерывное поступление цезия. Для первого раза были сделаны расчеты для разного количества частиц, поступающих на каждом шаге: от 10 до 10^5 . Максимальное значение, предусмотренное программой, составляет 10^6 , однако, моделирование уже для 10^5 частиц при количестве шагов 100 и длительности 100 мс занимает около 30 часов. Увеличение числа частиц в 10 раз, увеличивает во столько же число операций и, следовательно, как минимум во столько же раз увеличивает время расчета. Таблица 2 отображает, как изменялось число частиц, попадающих в каждое отверстие, при изменении числа инжектируемых частиц:

номер отверстия	количество инжектируемых на каждом шаге частиц			
	10	100	1000	100000
1	1	7	88	12779
2	7	55	547	72539
3	0	0	3	513

Таблица 2. Зависимость числа частиц, попадающих в каждое отверстие, от числа инжектируемых частиц.

Моделирование для малых значений числа инжектируемых частиц проводилось для большого количества и длительности шагов (1000 шагов по 1с). Для 10^5 частиц расчеты были сделаны только для 100 шагов по 100 мс, из-за значительного увеличения общего времени моделирования.

Как видно из таблицы, число частиц попадающих в третье отверстие на несколько порядков ниже числа частиц попадающих в первые два отверстия, что расходится с результатами эксперимента. Объяснить это можно тем, что при моделировании число

инжектируемых частиц гораздо меньше соответствующего реальности. То есть можно сказать, что программа подходит только для моделирования при низком давлении паров цезия.

Можно оценить, какое число частиц необходимо задавать, чтобы расчеты соответствовали реальному эксперименту. Зная давление паров цезия, можно вычислить концентрацию частиц используя уравнение для идеального газа: $n = \frac{P}{kT}$.

При температуре $T = 150 \text{ }^{\circ}\text{C} = 423 \text{ K}$ давление пара цезия равно примерно $P \approx 100 \text{ Па}$. Таким образом, концентрация частиц $n \approx 10^{23}$.

За один шаг инжектируется $N = nV = nSv\Delta t$ частиц, где S – площадь сечения паропровода, v – средняя скорость частиц, Δt – длительность 1 шага в расчетах. Площадь паропровода составляет величину порядка 10 мм^2 или 10^{-5} м^2 , среднюю скорость частиц при $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ можно оценить величиной порядка 10^4 м/с , длительность шага равна $0,1 \text{ с}$.

При таких параметрах получается, что число инжектируемых на каждом шаге частиц должно быть порядка $10^{18} - 10^{19}$, что значительно больше максимально возможного значения, предусмотренного программой.

Глядя на результаты можно заметить, что число частиц попавших во второе отверстие больше, чем число попавших в первое. Это можно объяснить тем, что плоскость источника частиц расположена так, что ее нормаль направлена вдоль паропровода, и большинство частиц пролетает мимо первого отверстия расположенного близко к источнику. Если повернуть источник так, чтобы нормаль была поперек паропровода, то число частиц попавших в первое отверстие больше, чем число попавших во второе (рисунок 23).

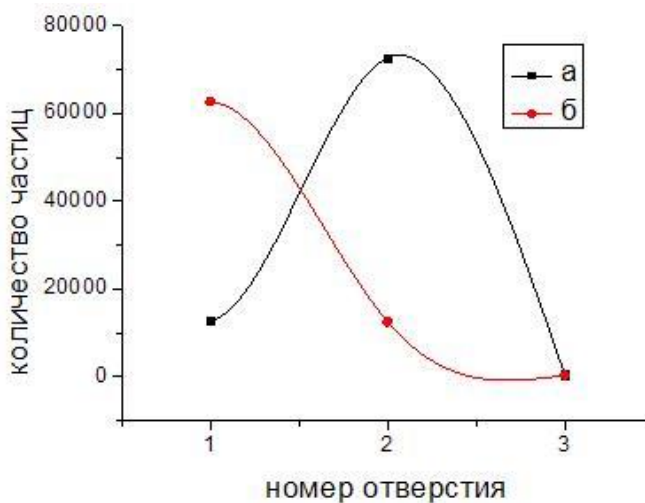


Рисунок 23. Сравнение результатов моделирования для разных положений плоскости источника: а) нормаль плоскости источника направлена вдоль паропровода, б) нормаль плоскости источника поперек паропровода.

Основные результаты работы и выводы

Основным результатом работы является действующий макет распределенной подачи цезия. Если перед началом стендовых работ имелись лишь некоторые представления о необходимых параметрах системы цезирования с галереей раздачи, то по их окончании можно говорить о том, что сделан большой шаг к созданию реально действующей установки.

Более конкретно можно выделить следующие результаты, особенно важные с конструкторской точки зрения:

- Доказано, что транспортировка паров цезия на большое расстояние по каналу со встроенным внутрь нагревным кабелем значительно упрощает конструкцию, а значит, повышает надежность и снижает стоимость.
- За счет оптимизации размеров выходных отверстий достигнута приемлемая однородность распределенной подачи цезия через галерею (рисунок 16).
- Были определены основные характеристики подачи через галерею- время выхода на стационар, время выключения, зависимость скорости подачи от температур (рис 21).
- Определена конструкция мембранного ввода паропровода в вакуум. Разработана надежная конструкция ввода паропровода в вакуум, обеспечивающая отсутствие холодного участка, где могла бы возникнуть конденсация паров цезия.
- Определено количество необходимой теплоизоляции цезиевой системы снаружи.
- Определены параметры источников для нагрева различных элементов системы цезирования, на основе которых будет сделан специальный блок питания.

Список литературы

1. Raphael Gutser «Experiments and Simulations for the Dynamics of Cesium in Negative Hydrogen Ion Sources for ITER N-NBI», 2010.
2. Журнал REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS **83, 02B118** (2012), «Multiple delivery cesium oven system for negative ion sources».
3. Журнал REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS **83, 02B110** (2012), «Cesium dynamics in long pulse operation for negative hydrogen ion sources for fusion».
4. Журнал PHYSICAL REVIEW **B19**, (1979). «Secondary-ion emission probability in sputtering».
5. Журнал NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS IN PHYSICS, **B40-41** (1989), «The sputter generation of negative ion beams: analytical modeling»
6. Журнал REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS **65**, (1994), « Design features of a high-intensity, cesium-sputter/plasma-sputter negative ion source».