

Министерство образования  
Российской Федерации  
Новосибирский Государственный Университет  
Физический факультет  
Кафедра физики плазмы

Квалификационная работа на соискание степени магистра

# НАПУСК ГАЗА В ЦЕНТРАЛЬНЫЙ СОЛЕНОИД УСТАНОВКИ АМБАЛ-М

Разоренов Вячеслав Владимирович

Научный руководитель

Давыденко Владимир Иванович, к.ф.м.н

Кривенко Александр Сергеевич, б.с.

---

Новосибирск – 2002

# Содержание

## I. Введение

## II. Схема эксперимента

1. Устройства для дополнительного напуска газа
2. Расположение диагностик в центральном соленоиде
3. Магниторазрядные манометры

## III. Эксперименты по повышению плотности плазмы в центральном соленоиде

1. Динамика распространения газа в установке
2. Параметры плазмы при напуске водорода через керамическую трубку
3. Параметры плазмы при напуске водорода в газовую коробку
4. Сравнение двух режимов подачи газа
5. Численная модель создания плазмы и напуска газа

## IV. Заключение

## V. Литература

## I. Введение

Впервые как средство удержания высокотемпературной плазмы для осуществления термоядерного синтеза открытые ловушки были предложены независимо Будкером в СССР и Постом в США в начале 50-х годов. Позже численными расчетами было показано, что приемлемый уровень экономической эффективности в реакторах открытого типа не достигается из-за малого времени продольного удержания плазмы. Поиск различных способов увеличения этого времени привел к концепции амбиполярного продольного удержания двойными пробками [1]. Эта идея была высказана независимо в СССР и США и вскоре дополнена предложением использовать в ловушке термобарьеры, что повысило расчетную эффективность реактора открытого типа.

Амбиполярные ловушки открыли новую главу теоретических и экспериментальных исследований открытых систем. Первые исследования, начатые во второй половине 70-х годов, подтвердили возможность многократного увеличения времени продольного удержания плазмы амбиполярными пробками по сравнению с обычными магнитными пробками. В амбиполярных ловушках второго поколения (TMX-Upgrade, GAMMA-10), была сделана попытка перейти к параметрам плазмы, приближенным к реакторным.

Неосесимметричные магнитные поля, обеспечивающие МГД-стабилизацию плазмы на установках TMX-Upgrade и GAMMA-10, являются источником усиленных поперечных потерь плазмы, которые становятся ощутимыми на фоне подавленных продольных потерь. Большие поперечные потери в амбиполярных ловушках с аксиально несимметричной конфигурацией магнитного поля вызваны неоклассической поперечной диффузией [1,2].

В нашем институте сооружается полностью осесимметричная амбиполярная ловушка АМБАЛ-М [3,4], на которой предполагается получить плазму с высокими параметрами, МГД-устойчивую в осесимметричной геометрии за счет стабилизации полукаспом, усовершенствовать формирование потенциальных барьеров и исследовать поперечный перенос плазмы. В настоящее время введена в эксплуатацию вторая очередь установки (Рис.1), на которой проводятся эксперименты по получению и изучению стартовой плазмы, пригодной для дальнейшего квазистационарного нагрева с помощью инжекции высокоэнергетичных атомарных пучков и путём ввода ВЧ-мощности.

Стартовая плазма с плотностью частиц  $n \approx 1.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  создается заполнением ловушки плазменной струей от кольцевого газоразрядного источника [5], расположенного в запусочной области. Эта струя с развитой низкочастотной турбулентностью. Поперечное электрическое поле, определяемое потенциалами на электродах пушки, приводит к развитию неустойчивости Кельвина-Гельмгольца [6]. Возникающие в плазме электростатические колебания с широким спектром приводят к стохастическому анизотропному (в поперечную степень свободы) нагреву ионов. В работе [7] плотность мощности нагрева вблизи пушки оценивалась величиной, равной  $10 \text{ Вт/см}^3$ . В той же работе приведена зависимость мощности нагрева

$$P \propto n \frac{E^2}{B^2}.$$

Генерируемая пушкой плазменная струя втекает в соленоид по силовым линиям магнитного поля. Температура ионов в струе обычно не превышает 50 эВ [8] из-за торможения ионов на электронах, при этом электронная компонента вследствие высокой продольной теплопроводности на источник плазмы оказывается термостатированной на уровне  $\sim 10 \text{ В}$ . Измеренная ленгмюровскими зондами температура электронов в соленоиде, составляет величину  $T_e \approx 50 \text{ эВ}$ . Энергия

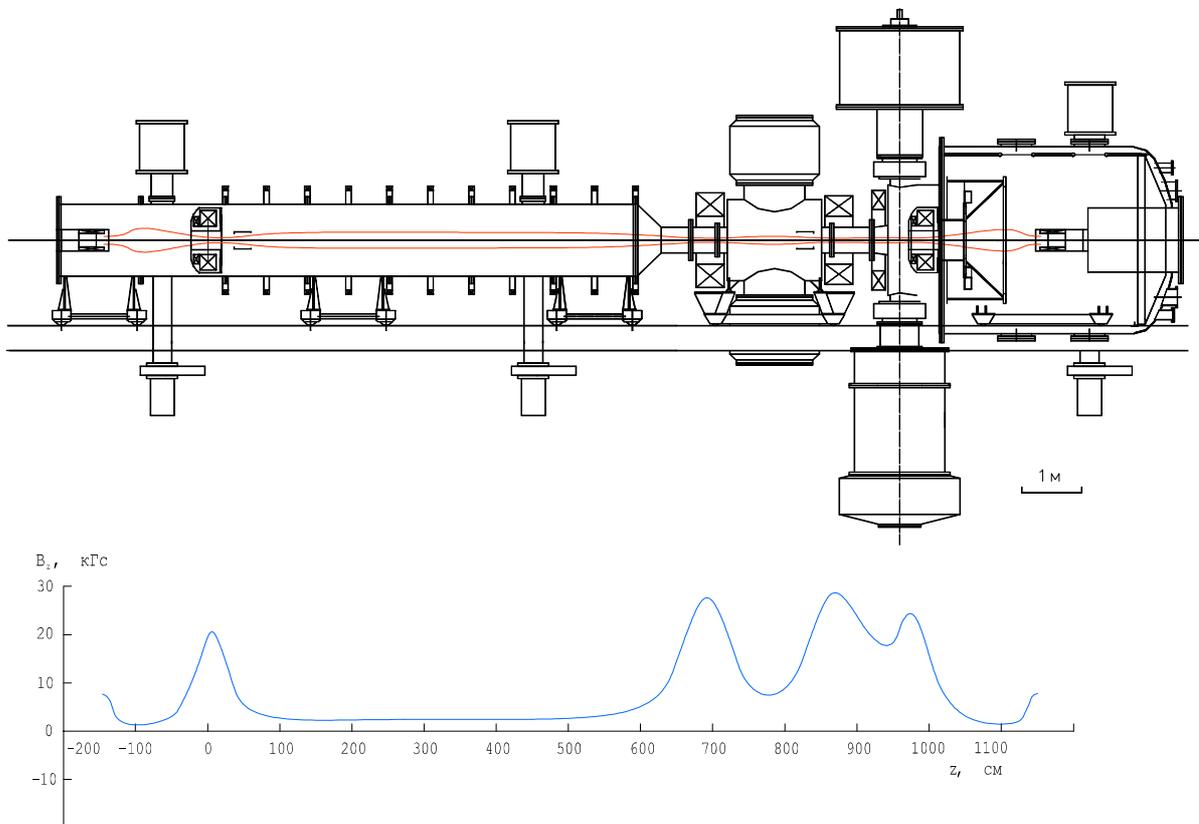


Рис.1. Амбиполярная ловушка АМБАЛ-М (вторая очередь).

вытекающих из соленоида ионов, регистрируемая торцевым сеточным анализатором на плазмодриемнике  $E_i \sim 400$  эВ. Высокая температура ионов и электронов в соленоиде указывает на формирование в пробке минимума потенциала, термоизолирующего электроны в соленоиде от холодных электронов в транспортирующей области.

Оптимальной мишенной плазмой является достаточно плотная плазма с высокой температурой электронов и хорошими газовыми условиями. Поскольку захват пучка происходит в основном в результате перезарядки, желательно иметь такие размер и плотность плазмы, чтобы значительная часть инжектируемых атомов захватывалась. Скорость потери энергии захваченных горячих ионов из-за торможения на электронах мишенной плазмы описывается как

$$\frac{dE}{dt} = \frac{E_i}{\tau_{ie}}, \text{ где } \tau_{ie} = \frac{3MT_e^{3/2}}{8\sqrt{2}\pi e^4 \lambda \sqrt{mn}}.$$

Ещё одним процессом, определяющим время жизни захваченных ионов, является перезарядка на газе, поэтому для создания популяции захваченных ионов необходимо иметь хорошие газовые условия.

Эксперименты по накоплению ионно-горячей плазмы импульсной инжекцией [9,10] проводились ранее на первой очереди установки, которая включала в себя концевой пробкотрон с присоединенным полукаспом. Радиус мишенной плазмы в центре пробкотрона 10 см, плотность  $n = 6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , ионная температура  $T_i = 250$  эВ и электронная температура  $T_e = 50$  эВ. Инжекция атомарных пучков в пробкотрон проводилась под углом  $60^\circ$  при использовании двух инжекторов СТАРТ-2 с энергией атомов в пучке 16 кэВ, суммарным током до 80 А и длительностью импульса 200 мкс. Было продемонстрировано начальное накопление популяции горячих ионов со скоростью  $2.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Средняя плотность горячих ионов к концу импульсной инжекции в объёме 20 литров составила величину  $\langle n \rangle \sim 0.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Низкий процент захвата пучков инжектируемых атомов ( $\sim 10\%$ ) не позволил достигнуть равновесной плотности горячих ионов за время импульса инжекции. При этом сильно ухудшались вакуумные условия в камере, поэтому время жизни горячих ионов определялось перезарядкой на газе и составляло  $\sim 500$  мкс.

Накопление горячей плазмы в центральном соленоиде возможно осуществить инжекцией атомарных пучков из четырех квазистационарных инжекторов ИК-50, которые в настоящее время установлены в концевой системе установки. Каждый инжектор ИК-50 генерирует 30-амперный пучок атомов дейтерия энергией 25 кэВ в течение 10 мс. Мишенная плазма в соленоиде, создаваемая газоразрядным источником,

может обеспечить захват  $\sim 30\%$  пучка, темп накопления популяции горячих ионов в объеме 700 литров составит величину  $\sim 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ .

При умеренной плотности мишенной плазмы захват быстрых ионов из пучка прямо пропорционален плотности мишенной плазмы, скорость потери энергии захваченных ионов из-за торможения на электронах также прямо пропорциональна плотности мишенной плазмы. Поэтому равновесная плотность захваченных ионов в первом приближении не зависит от плотности мишенной плазмы и зависит от электронной температуры как  $T_e^{3/2}$ .

Увеличение плотности плазмы в соленоиде для обеспечения лучшего захвата пучков атомарной инжекции представляется необходимым. Это позволит, во-первых, быстрее достигнуть равновесной плотности популяции горячих ионов, во-вторых, уменьшит влияние перезарядных потерь. Кроме того, при лучшем захвате атомарных пучков увеличится нагрев электронов, поэтому равновесная плотность захваченных ионов будет больше. Также температуру электронов можно повысить путем ввода в соленоид СВЧ-мощности.

При повышении плотности мишенной плазмы желательно остаться на линейном участке зависимости доли захваченных атомов пучка от толщины мишени. Оптимальным является увеличение мишенной плотности в 3 раза до величины  $\sim 6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , при этом доля захваченных атомов пучка составит  $\sim 70\%$ .

Цель данной работы состояла в повышении плотности плазмы в соленоиде доступными средствами. Проведен ряд экспериментов по дополнительной подаче газа на ось плазменного шнура через керамическую трубку и на периферию плазмы при использовании газовой коробки.

Дополнительный напуск газа применяется на многих открытых ловушках. Навпуск газа в центральную ячейку открытой ловушки TARA при вводе ВЧ-мощности осуществлялся в газовую коробку, расположенную в центре ячейки [11]. На установке GAMMA-10 для подачи газа, в частности, используются окружающие плазменный шнур трубки [12]. Дополнительна подача газа через трубку и газовую коробку была реализована на установке ГДЛ [13].

## II. Схема эксперимента

В настоящее время введена в эксплуатацию вторая очередь установки (Рис.1), которая включает в себя центральный соленоид, концевой пробкотрон и полукасп.

Магнитное поле установки, создаваемое ударными генераторами, в пробках имеет величину 2 Тл. Пробочное отношение для центрального соленоида равно 10, для концевого пробкотрона 4. Ловушка заполняется турбулентной плазменной струей от двух кольцевых газоразрядных источников, расположенных в запробочных областях. Каждый источник помещен внутрь импульсного соленоида, обеспечивающего согласование начального диаметра плазменной струи с диаметром плазмы в соленоиде.

Большинство описанных в работе экспериментов проводилось при включении только одного источника возле центрального соленоида установки. Длительность импульса тока разряда источника  $\sim 4$  мс. Генерируемая источником плазма проходит через транспортирующую область и попадает в соленоид с расстоянием между пробками 6 м. Диаметр плазмы в соленоиде 40 см, плотность  $n \approx 1.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , температура ионов  $T_i \approx 250$  эВ, температура электронов  $T_e \approx 50$  эВ.

### Устройства для дополнительного напуска газа

Эксперименты по напуску дополнительного газа в центральный соленоид проводились в два этапа. В первом из них для подачи газа на ось плазменного шнура использовалась керамическая трубка. В последующих экспериментах трубка была заменена газовой коробкой, которая подает газ с периферии.

Место расположения дополнительного газонапуска должно удовлетворять двум противоречивым требованиям. С одной стороны, газ должен напускаться в достаточно толстую плазму, где он эффективно ионизируется и захватывается, с другой стороны, напуск желательно располагать дальше от основной плазмы, чтобы не увеличивать перезарядные потери. В наших экспериментах трубка и газовая коробка располагались вблизи входной пробки в магнитном поле 5 кГс. В этой области плотность плазмы  $\sim 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , длина свободного пробега франк-кондоновского атома относительно ионизации составляет величину порядка радиуса плазменного шнура. Магнитное поле в пробке 2 Тл обеспечивает захват  $\sim 90$  % образующихся ионов.

Напуск газа осуществлялся через импульсный клапан [15], заземленный на корпус установки. Чтобы при напуске газа на ось не возмущать плазму находящимся

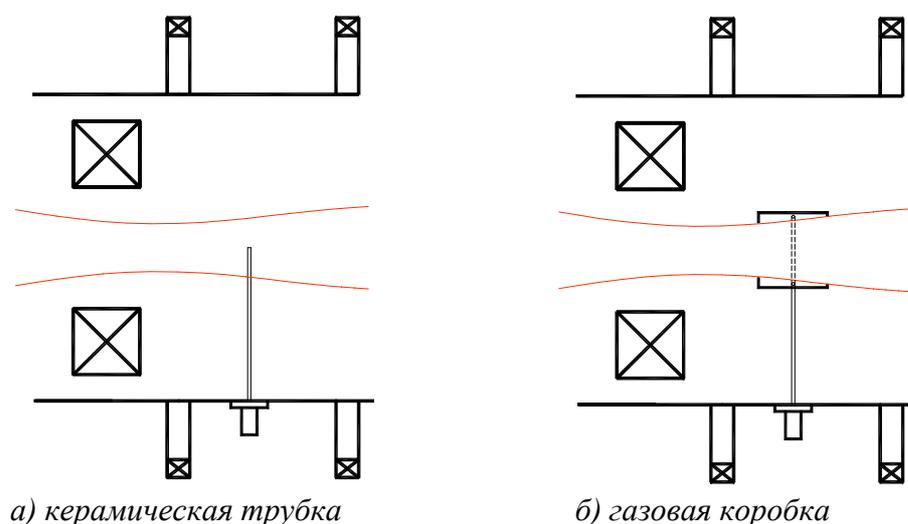


Рис.2. Устройства для дополнительного напуска газа.

под земляным потенциалом электродом, на металлическую трубку была одета керамическая трубка (Рис.2а) с внутренним диаметром 4 мм и наружным 8 мм.

Газовая коробка (Рис.2б) сделана из ниобия и представляет собой цилиндр и две диафрагмы. Диаметр цилиндра 25 см, высота 14 см, внутренние диаметры диафрагм 18 см и 23 см расположены на одной силовой линии, которая в центральной части соленоида имеет диаметр 36 см. Высота коробки по порядку величины равна длине пробега франк-кондоновского атома относительно ионизации электронным ударом. Газовая коробка заземлена.

Подводящая газ трубка располагается по внутреннему ободу коробки и имеет восемь отверстий диаметром 1 мм для более равномерного напуска газа.

### Расположение диагностик в центральном соленоиде

Для определения параметров плазмы в соленоиде использовался набор диагностик, показанный на Рис.3. Плотность плазмы и электронная температура измерялись подвижными по радиусу ленгмюровскими зондами 2, 4, 5, 8. Приведенные в работе зависимости, измеренные тем или другим зондом, обозначены соответствующей продольной координатой  $Z$ . Начало отсчета ведется от входной пробки соленоида.

Зонды 5 и 8 в центральной части соленоида (в области однородного магнитного поля) по абсолютной величине калибровались по ослаблению пучка диагностического инжектора 6. Полученный коэффициент использовался и для зонда 4 в области пробки, имеющего такую же геометрию.

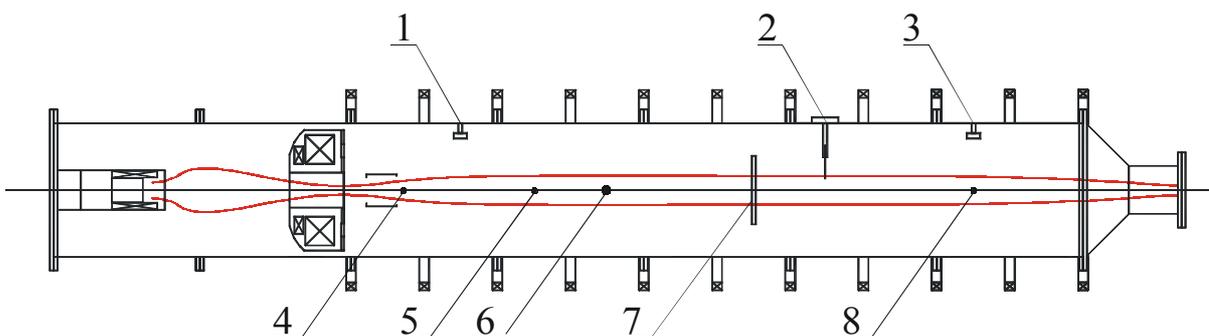


Рис.3. Схема расположения диагностик в центральном соленоиде.

1,3 – магниторазрядные манометры; 2 – тройной зонд; 4,5,8 – двойные зонды;  
6 – диагностический инжектор; 7 – диамагнитная петля

Энергосодержание плазмы определялось диамагнитной петлей 7. Для измерения давления нейтрального газа в соленоид были установлены магниторазрядные манометры 1, 3.

### Магниторазрядные манометры

При импульсных измерениях вакуума вблизи границы плазмы, проводимых ионизационными манометрами, требуется тщательная экранировка манометра от потоков частиц из плазмы, поскольку быстрые частицы, проникая в рабочий объем, способны вызвать вторичную ионную или электронную эмиссию и тем самым создать значительные помехи при измерениях. Такая экранировка снижает пропускную способность входных окон. Увеличение постоянной времени натекания газа во внутренний объем ячейки  $\tau=V/u$ , где  $V$  – объем ячейки,  $u$  – проводимость окон, приводит к ухудшению временного разрешения манометра до  $1\div 2$  мс.

Для импульсного измерения газа в центральном соленоиде были установлены магниторазрядные манометры, разработанные Е.Д.Бендером [16], постоянная времени которых составляет 50-300 мкс. Манометр сделан на основе обращенного магнетрона, работающего во внешнем магнитном поле установки

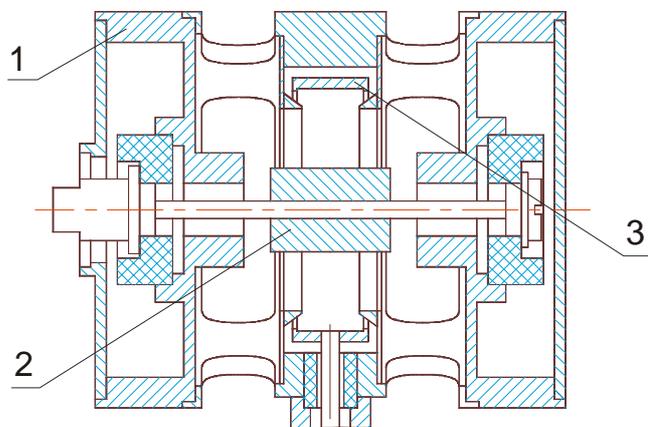


Рис.4. Магниторазрядный манометр.

1 – катод; 2 – анод; 3 – коллектор ионов

(Рис.4). Замкнутый кольцевой коллектор расположен таким образом, чтобы на него попадали ионы, образующиеся в холловском слое, окружающем анод. Холловский слой образован электронами, дрейфующими в скрещенных электрическом и магнитном полях. Ионы ускоряются поперек этого слоя перпендикулярно к аноду.

Размер магниторазрядной ячейки манометра выбран соответствующим величине магнитного поля в соленоиде 2 кГс. При правильном подборе геометрии ячейки толщина холловского слоя много меньше расстояния между катодом и анодом, при этом на холловском слое сосредоточено почти все падение напряжения разряда. Величина холловского тока при данной геометрии ячейки, напряжении на разряде и магнитном поле во всем диапазоне измеряемых давлений  $10^{-2} - 10^{-6}$  Па не зависит от давления. Плотность ионизирующих электронов остается постоянной, поэтому ток ионов на коллектор оказывается пропорционален давлению измеряемого газа.

В нашем случае нет необходимости использовать дополнительный электрод для поджига разряда. Магнитное поле установки создается ударными генераторами и имеет длительность порядка секунды, что достаточно для возникновения самостоятельного разряда.

Калибровка манометров проводилась по ухудшению вакуума при выключенной откачке. Давление в установке измерялось промышленными вакуумметрами ВМБ-1-8.

Приведенная на Рис.5. градуировочная кривая демонстрирует линейную зависимость тока ионов на коллектор от величины измеряемого давления. Поскольку манометры калибровались по воздуху, то при работе с водородом для пересчета показаний манометров используется коэффициент 0.43.

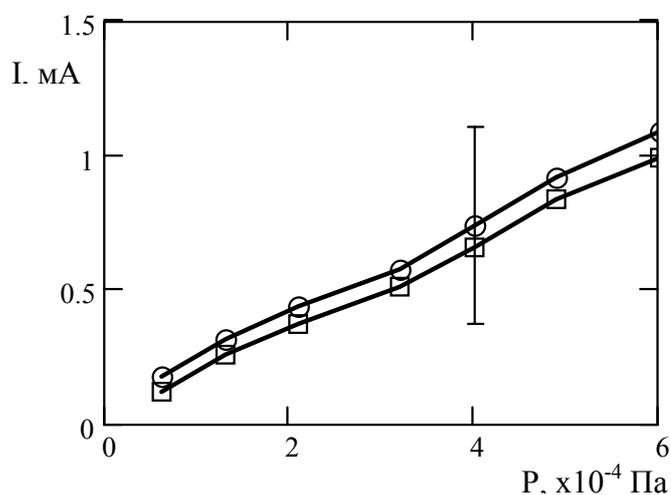


Рис.5. Градуировочная кривая

### **III. Эксперименты по повышению плотности плазмы в центральном соленоиде**

#### **Динамика распространения газа в установке.**

Осциллограммы сигналов магниторазрядных манометров иллюстрируют динамику распространения газа в установке при различных режимах работы.

Выстрел без дополнительного напуска газа приведен на Рис.6а. Пушка включается в 0 мс и работает 4 мс, в это время идет рост давления газа в соленоиде, вызванный рециклингом водорода со стенок камеры. В пробкотроне давление газа растет медленнее, поскольку объем пробкотрона равен примерно половине объема соленоида, а количество плазмы в нем в 30 раз меньше.

С выключением пушки прекращается нагрев ионов неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца, плазма остывает, и рециклинг прекращается. Холодная плазма теряется за время  $\sim 2$  мс, что связано с характерным временем затухания тока разряда пушки. За время существования холодной плазмы примерно половина общего количества газа в соленоиде, накопленного за счет рециклинга, ионизуется и теряется вместе с плазмой.

Подъем сигнала на ближнем к пушке манометре после распада плазмы связан с приходом в эту область газа от пушки.

Выстрел с напуском водорода в газовую коробку 100 л Торр/с показан на Рис.6б. Клапан газонапуска включается в 0 мс. Время заполнения газом подводящей трубки и газовой коробки составляет  $\sim 4$  мс. Далее виден рост давления в области первого манометра, это заполняется ближняя к газовой коробке часть соленоида. В 9 мс начинает работать пушка. При дополнительном напуске газа увеличивается плотность плазмы, возрастает поток из плазмы атомов перезарядки, и со стенки сбивается большее количество газа. Прирост давления от рециклинга примерно одинаков во всем соленоиде.

В 13 мс выключается пушка. Время существования холодной плазмы, определяемое затуханием тока разряда пушки, в этом случае такое же, как и без напуска газа, поэтому одинакова и доля газа в соленоиде, которая ионизуется холодной плазмой и вместе с ней теряется.

После распада плазмы происходит выравнивание давления в соленоиде. Это время можно оценить, рассматривая соленоид как трубу, проводимость которой для молекулярного течения определяется по известной формуле

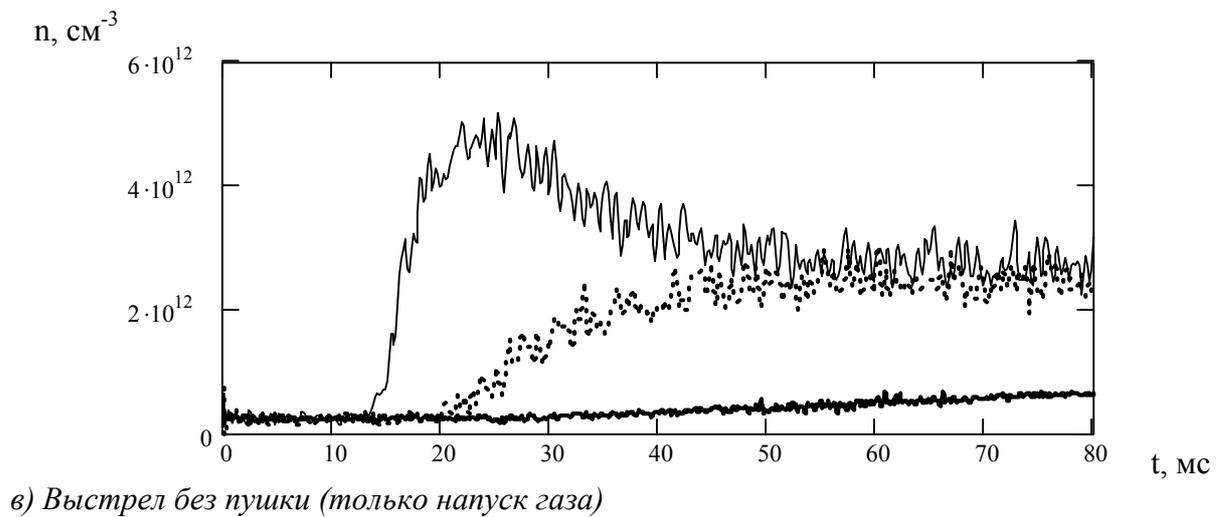
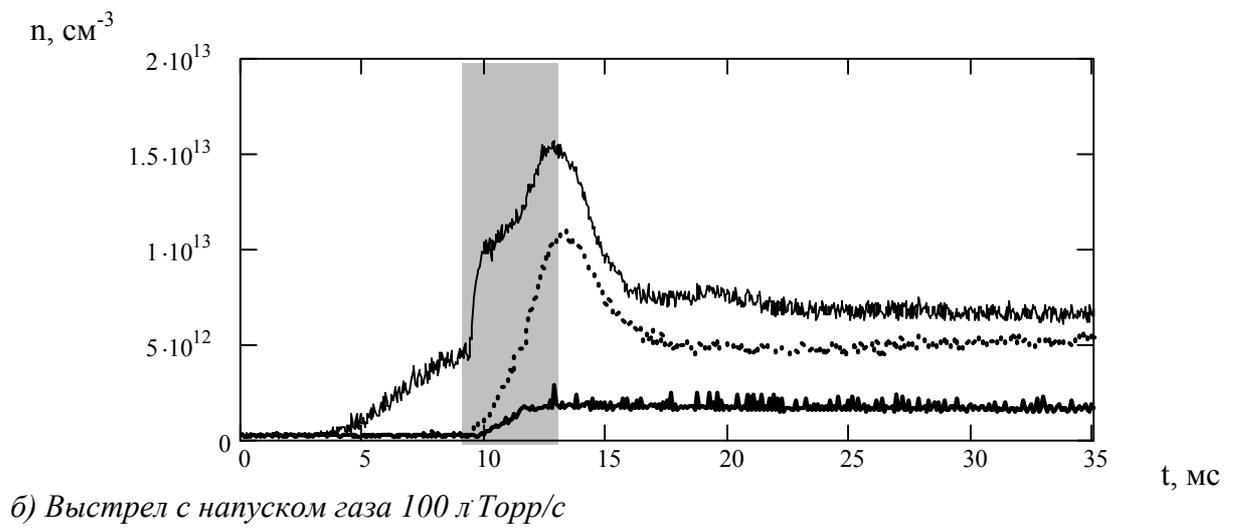
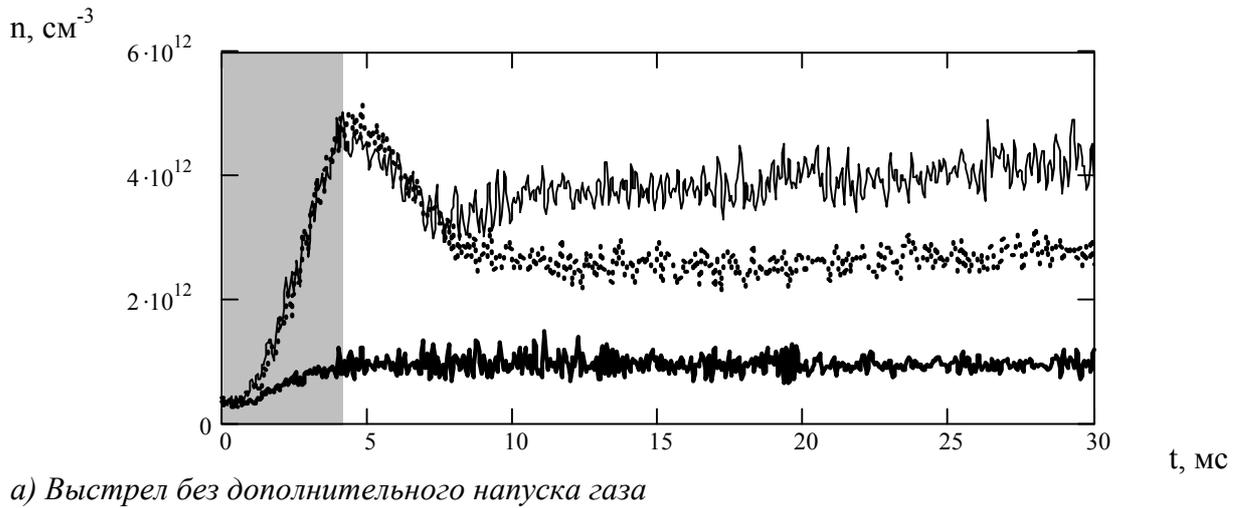


Рис.6. Осциллограммы сигналов магниторазрядных манометров  
тонкая линия – манометр возле пушки, прерывистая линия – манометр возле  
пробкотрона, толстая линия – манометр в пробкотроне,  
вертикальная полоса соответствует импульсу пушки

$$U = 121 \frac{D^3}{L}, \quad \tau = \frac{V}{U} \approx 20 \text{ мс.}$$

Осциллограмма давления при включении только клапана газонапуска приведена на Рис.6в. Напуск осуществляется в газовую коробку. В 10 мс открывается клапан, через 4 мс начинает расти давление в ближней части соленоида и за 5÷6 мс достигает равновесной величины. Далее происходит выравнивание давления во всем соленоиде за время ~20 мс. Поскольку давление при этом уменьшается в два раза, то можно считать, что потоком газа через клапан изначально заполняется половина соленоида. Отсюда получается оценка величины потока газонапуска ~ 100 лТорр/с.

Труба, соединяющая центральный соленоид с пробкотроном, имеет диаметр 35 см. Выравнивание давления в соленоиде и пробкотроне происходит за время  $\tau \approx 250$  мс. Время релаксации давления во всей установки ~ 1 с. Такого же порядка и характерное время откачки, которая обеспечивается четырьмя турбомолекулярными насосами с суммарной скоростью 3000 л/с.

Проведено моделирование динамики распространения газа в установке методом пробных частиц программой “CreatVac”. Эта программа написана нами как развитие предыдущего варианта [17], рассчитывает большее количество пробных частиц, имеет удобный пользовательский интерфейс и лишена выбывания пробных частиц при вычислении. Рассчитана зависимость давления в различных частях установки от времени при напуске порции газа через импульсный клапан, открытый в течение 10 мс. Локальные величины давления в местах расположения манометров приведены на Рис.7. Рассчитанные программой зависимости хорошо совпадают с показаниями манометров.

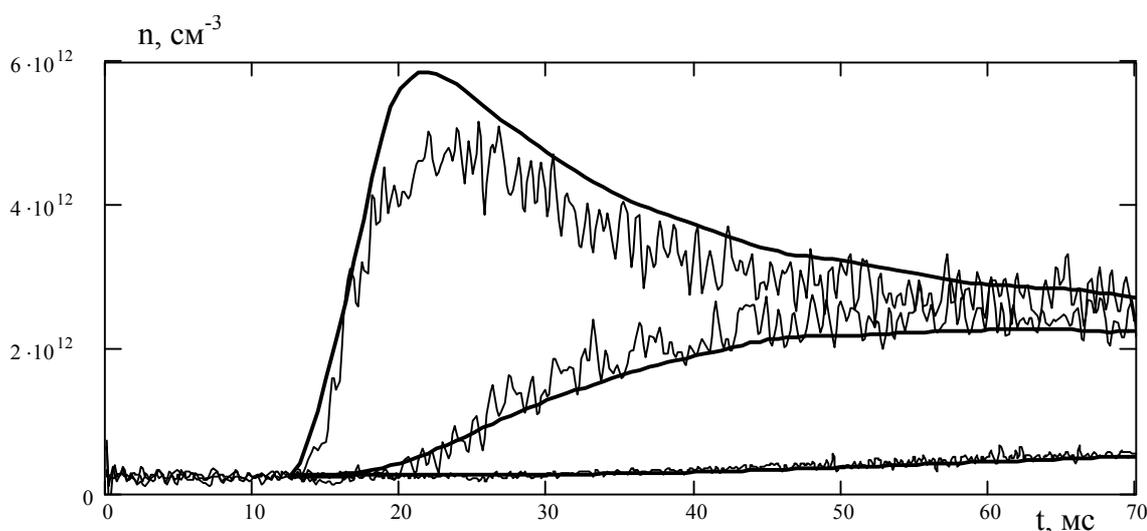


Рис.7. Динамика распространения газа в установке  
тонкие линии – осциллограммы сигналов магниторазрядных манометров,  
толстые линии – локальные величины давления, рассчитанные программой “CreatVac”

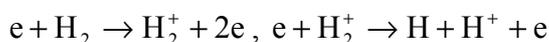
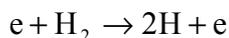
## Параметры плазмы при напуске водорода через керамическую трубку

Измеренная электронная температура в центральном соленоиде при напуске газа составляет величину 40-50 эВ.

На Рис.8. приведены осциллограммы плотности плазмы на оси и диамагнетизма при потоке газа через трубку  $\sim 80$  лТорр/с (400 экв. А). Плотность плазмы возрастает в  $2\div 2.5$  раза, энергосодержание в  $1.5\div 2$  раза. Поток ионов от пушки, оцененный по начальной стадии заполнения соленоида плазмой при отсутствии дополнительного напуска газа, составляет величину  $\sim 1.2 \cdot 10^{22}$  частиц/сек (2 кА). Поэтому поток в плазму 400 экв. А газа не может оказывать столь заметное влияние на плотность плазмы.

Увеличение плотности в  $2\div 2.5$  раза происходит за счет ранее напущенного в соленоид газа. Импульсный клапан открывается за 9 мс до начала работы пушки и создает в соленоиде локальное облако газа с плотностью частиц  $\sim 5 \cdot 10^{12}$  см $^{-3}$ . Общее количество напущенных частиц порядка  $10^{19}$ .

На начальной стадии накопления плазмы в соленоид начинают поступать ионы и электроны от пушки, имеющие такую же температуру, как и в транспортирующей области  $T_i \approx 50$  эВ,  $T_e \approx 10$  эВ. Происходит выгорание водорода в объеме плазменного шнура за счет процессов с участием электронов



Основную роль играют диссоциация и ионизация до молекулярного иона, вклад диссоциативной ионизации незначителен.

Молекулярный водород выгорает за время  $\sim 0.1$  мс, при этом, из соотношения сечений элементарных процессов, треть общего количества образующихся частиц

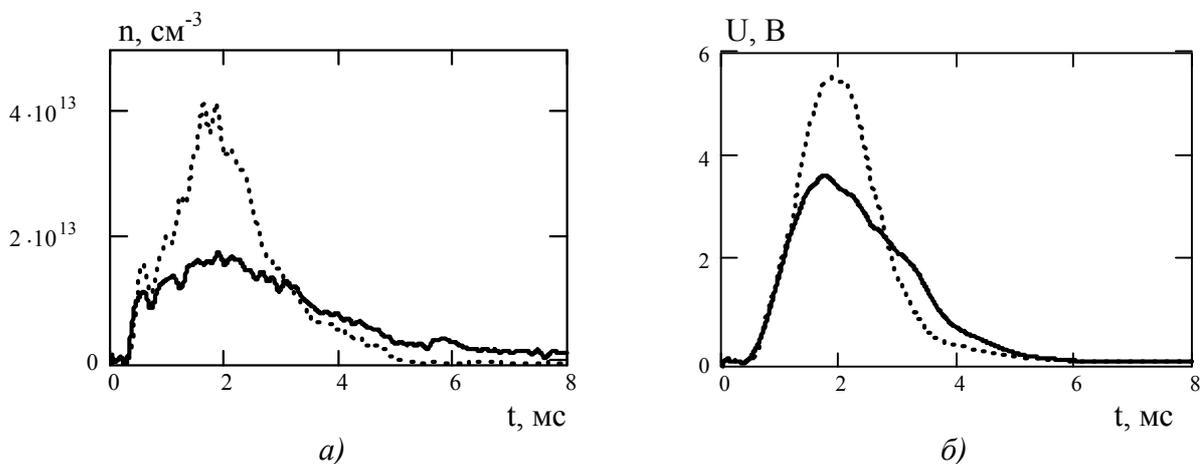


Рис.8. Осциллограммы плотности плазмы (а) и диамагнетизма (б) в соленоиде: сплошная линия – без газа, прерывистая линия – с газом  $\sim 80$  лТорр/с

составляют ионы, а две трети - атомы. Атомы и ионы франк-кондоновские, имеют энергию 1-2 эВ [18]. Далее медленные атомы ионизируются электронами и на них перезаряжаются быстрые ионы плазмы. Скорости обоих процессов примерно одинаковы и, поскольку перезарядка не меняет общего количества ионов, к плазме добавляется половина всего количества образующихся атомов. Время ионизации  $\sim 0.2$  мс, скорость образования медленных ионов  $\sim 1.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$  сравнима со скоростью накопления ионов от пушки  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ .

Другим процессом, приводящим к заметному увеличению плотности плазмы, является выгорание водорода во всем соленоиде. Поток газа из объема соленоида, не занятого плазмой, на поверхность плазменного шнура можно оценить как

$$-V_{\text{sol}} \frac{dn_{\text{sol}}}{dt} = \frac{n_{\text{sol}} v_T S_{\text{pl}}}{4} \approx 7 \cdot 10^{21} \text{ с}^{-1},$$

где  $V_{\text{sol}}$  - объем соленоида,  $n_{\text{sol}}$  - плотность газа в соленоиде,  $v_T$  - тепловая скорость молекулярного водорода, а  $S_{\text{pl}}$  - площадь плазменной границы. Время поглощения плазмой газа из соленоида  $\sim 1.5$  мс, поэтому для оценки скоростей элементарных

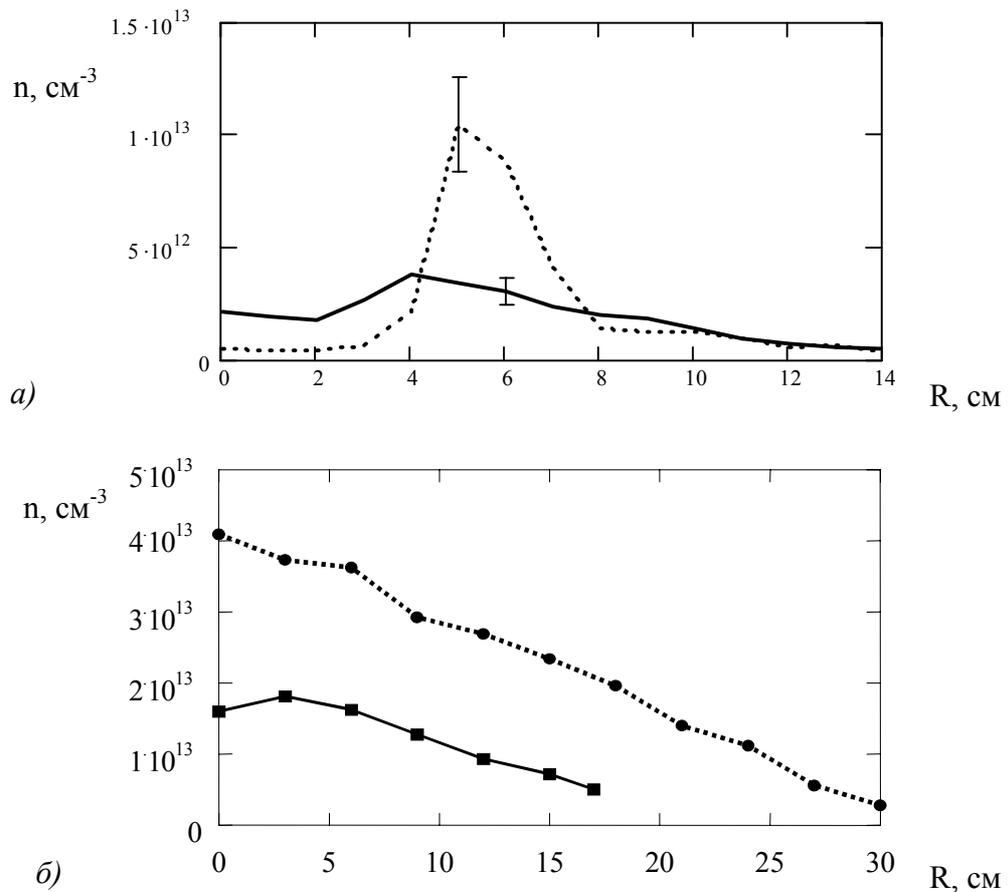


Рис.9. Профиль плотности плазмы возле газонапуска  $Z=53 \text{ см}$  (а) и в центральной части соленоида  $Z=413 \text{ см}$  (б): сплошная линия – без газа, прерывистая линия – с газом  $\sim 80 \text{ л Торр/с}$

процессов можно брать стационарную температуру электронов  $T_e = 50$  эВ. Длина свободного пробега молекулы по отношению к процессам ионизации и диссоциации  $\sim 1$  см, поэтому молекулярный газ в плазму не проникает. Около 40 % всего количества образующихся на периферии плазмы частиц ионизована. Поскольку процесс развала молекулярного водорода происходит в узком слое, нейтральные атомы с равной вероятностью попадают в плазму или уходят из области взаимодействия в соленоид. Время пролета франк-кондоновским атомом расстояния от стенки до плазменной границы  $\sim 15$  мкс, коэффициент отражения близок к единице. Поэтому, можно считать, что в плазму попадают все образующиеся на периферии атомы. Средняя скорость накопления ионов за счет газа в соленоиде составляет величину  $\sim 2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>с<sup>-1</sup>. Эта оценка снизу, поскольку плотность газа в соленоиде увеличивается за счет рециклинга водорода со стенки.

На Рис.9 представлены профили плотности плазмы непосредственно возле напуска газа и в центральной части соленоида. Форма профиля плотности в центральной части соленоида изменяется мало. Профиль плотности возле трубки газонапуска пикирован в области максимума плотности струи газоразрядного источника. В этом месте идет основная ионизация франк-кондоновских атомов, образующихся за счет потока газа через трубку. Средняя скорость такого накопления ионов в единице объема оценивается величиной  $\sim 0.5 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>с<sup>-1</sup>.

Таким образом, имеется три процесса, приводящих к увеличению плотности плазмы: собственно поток газа через трубку в течение всего импульса пушки, выгорание газа в объеме плазменного шнура за время  $\sim 0.2$  мс и поток в плазму газа из соленоида также в течение всего рабочего импульса. Медленные ионы, образующиеся в этих процессах, за время пролета между пробками нагреваются неустойчивостью

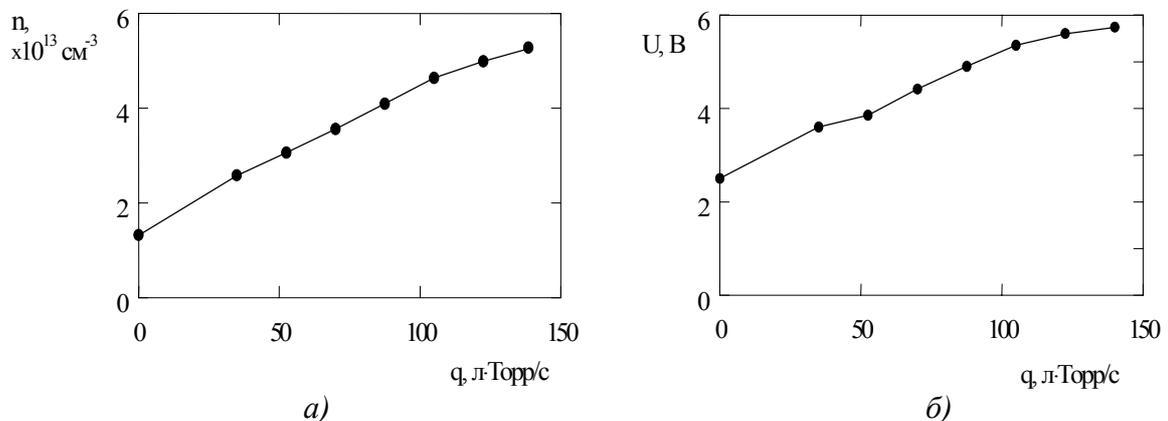


Рис.10. Зависимость плотности плазмы (а) и диамагнетизма (б) в соленоиде от темпа напуска газа

Кельвина-Гельмгольца в поперечную степень свободы на величину  $\sim 30$  эВ, поэтому значительная их часть захватывается.

Измерена зависимость параметров плазмы от темпа напуска газа (Рис.10). При потоке газа больше 100 лТорр/с наблюдается насыщение диамагнетизма. Мощность продольных и перезарядных потерь энергии превышает мощность нагрева плазмы неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца. Поскольку практический интерес представляет получение плотной плазмы при сохранении большой величины ионной и электронной температур и приемлемых газовых условий, разумно ограничиться темпом газонапуска 100 лТорр/с.

### Параметры плазмы при напуске водорода в газовую коробку

При дополнительном напуске водорода в газовую коробку наблюдается рост параметров плазмы в соленоиде. Поток газа в коробку  $\sim 100$  лТорр/с приводит к увеличению плотности плазмы на оси в 3-4 раза, диамагнетизма - в 2 раза (Рис.11).

Оценка скорости накопления плазмы, сделанная для случая напуска через трубку, справедлива и при напуске в газовую коробку. Газовая коробка заполняется до стационарной плотности  $\sim 5 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup> за время  $\sim 0.2$  мс, далее газ распространяется по соленоиду так же, как и при напуске через трубку. Объем газовой коробки мал по сравнению с объемом плазмы, поэтому запасаемое в ней количество газа мало влияет на увеличение плотности.

На Рис.12 приведены радиальные профили плотности плазмы, измеренные подвижными зондами в различных сечениях плазменного шнура. Профиль вблизи газовой коробки (Рис.12а) пикирован в области максимума плотности струи газоразрядного источника.

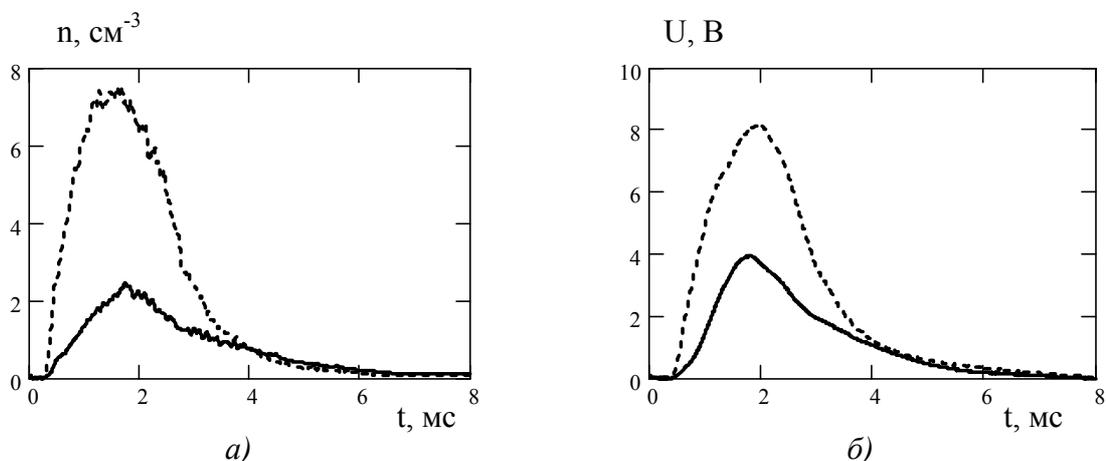


Рис.11. Осциллограммы плотности плазмы (а) и диамагнетизма (б) в соленоиде при напуске водорода в газовую коробку: сплошная линия – без газа, пунктирная линия – с газом  $\sim 100$  лТорр/с

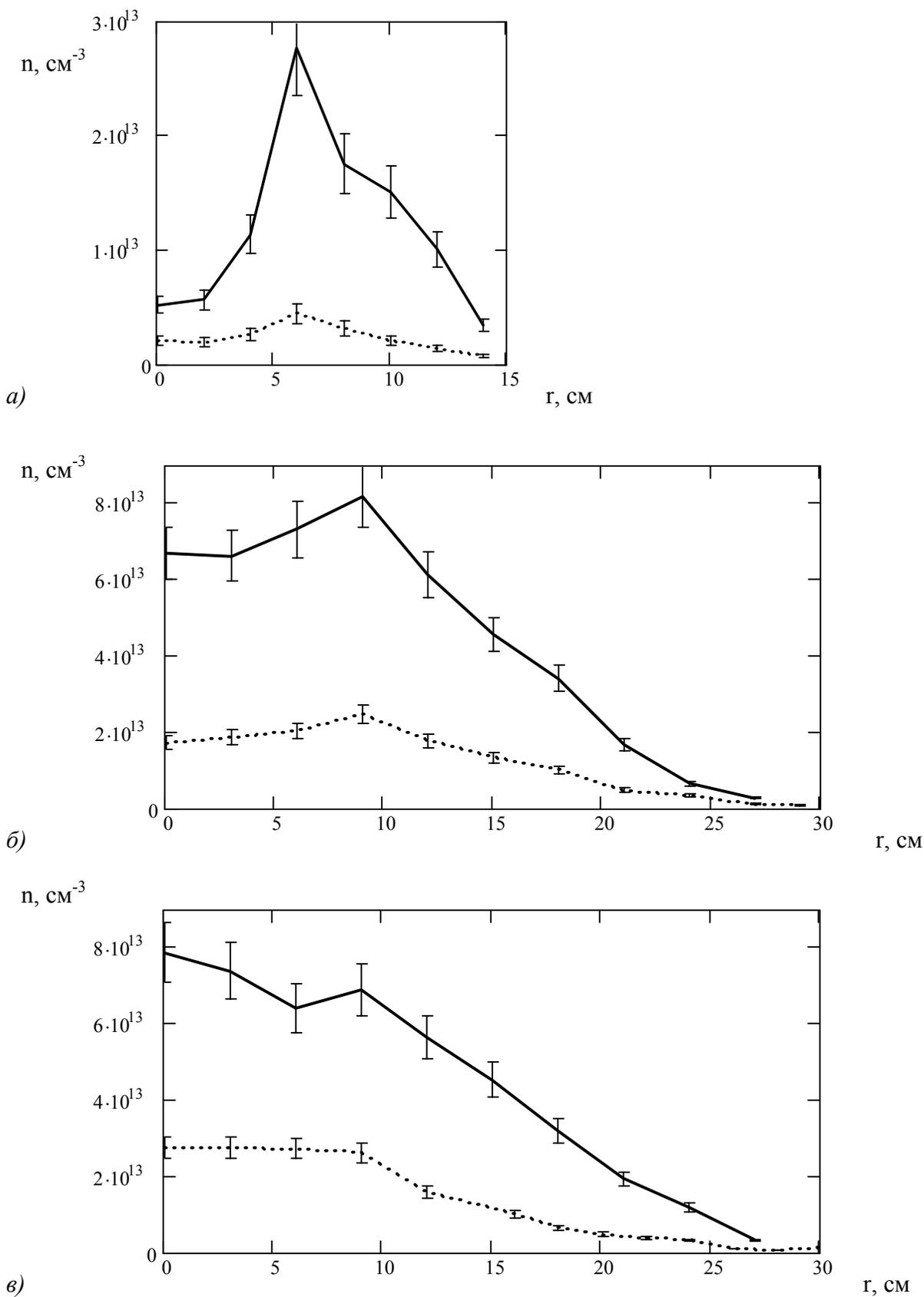


Рис.12. Профили плотности плазмы в сечении  $Z=53$  см (а),  $Z=163$  см (б),  $Z=413$  см (в):  
пунктирная линия – без газа, сплошная линия – с газом  $\sim 100$  лТорр/с

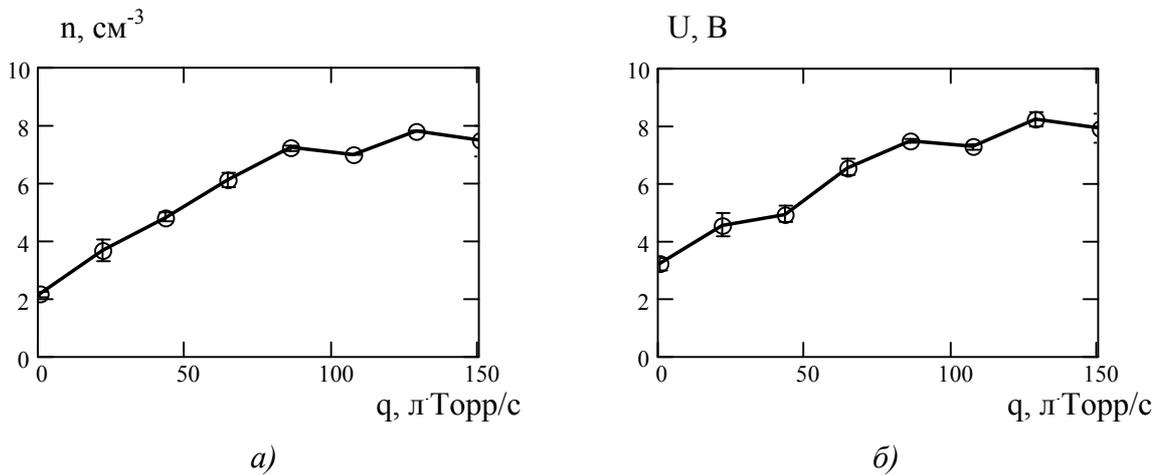


Рис.13. Зависимость плотности плазмы (а) и диамагнетизма (б) в соленоиде от темпа напуска газа

Молекулярный водород в газовой коробке ионизуется и диссоциирует в поверхностном слое плазмы толщиной  $\sim 1$  см. Плазма достаточно толстая, и в центр шнура проникает малая часть образующихся франк-кондоновских атомов, большинство ионизуется на периферии. Ионы захватываются в соленоид, нагреваются неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца и сваливаются на ось плазменного шнура.

Профиль плотности, измеряемый зондом, расположенным на расстоянии 1 м от газовой коробки (Рис.12б), имеет практически заполненную центральную область. Профиль в центральной части соленоида (Рис.12в) с измеряемой точностью не имеет провала на оси. Величина коэффициента поперечной диффузии, оцениваемая по скорости изменения радиального профиля, составляет  $D_{\perp} \sim 5 \cdot 10^5$  см<sup>2</sup>/с, что согласуется с данными других измерений поперечного переноса в соленоиде [19].

При потоке водорода в газовую коробку больше 100 лТорр/с наблюдается насыщение плотности плазмы и диамагнетизма (Рис.13), как и при использовании керамической трубки. Поэтому нет смысла увеличивать темп напуска больше этого

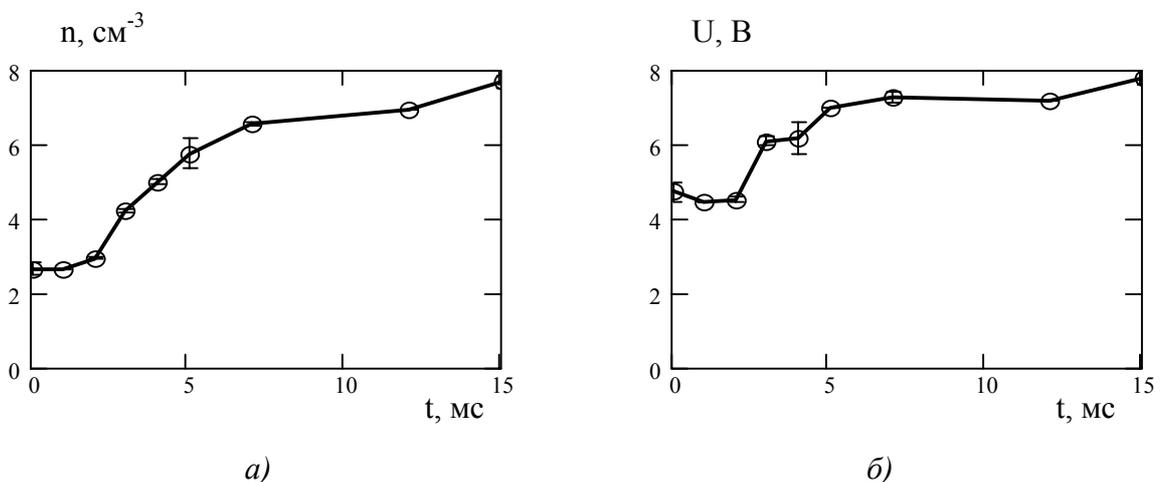


Рис.14. Зависимость плотности плазмы (а) и диамагнетизма (б) в соленоиде от времени задержки между напуском газа и импульсом пушки

значения, чтобы не увеличивать перезарядные потери.

Измерена зависимость параметров плазмы от времени задержки между напуском газа и пушкой (Рис.14). Подача газа начинает проявляться при задержке между клапаном и пушкой больше 3 мс. Плотность плазмы и диамагнетизм растут с увеличением количества газа, напущенного в соленоид до импульса пушки.

### Сравнение двух режимов напуска газа

На Рис.15 приведены нормированные на их максимальное значение осциллограммы плотности и диамагнетизма плазмы в соленоиде при двух способах подачи газа. При напуске водорода в газовую коробку плотность плазмы растет быстрее и достигает равновесной величины за время  $\sim 1$  мс, тогда как при напуске через керамическую трубку это время составляет  $\sim 1.5$  мс. Время потерь частиц одинаково в обоих режимах.

При работе газовой коробки диамагнетизм плазмы растет быстрее, чем при напуске газа через керамическую трубку, темп потерь энергии меньше. Этому можно предложить следующее объяснение.

При напуске газа через керамическую трубку на ось плазменного шнура молекулы водорода, ввиду малости длины свободного пробега, ионизируются и диссоциируют на атомы в области размером  $\sim 1$  см. Получается изотропный поток атомов, имеющих франк-кондоновскую энергию и большую ( $\sim 10$  см) длину свободного пробега. Средняя плотность атомов на длине порядка диаметра плазменного шнура составляет  $\sim 2 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>. В этой области образуется локальная перезарядная мишень,

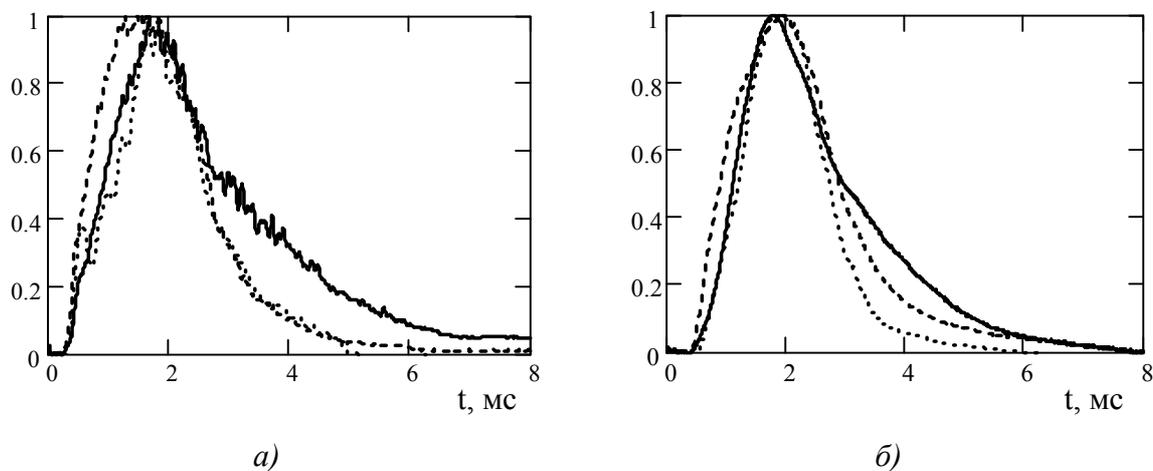


Рис.15. Осциллограммы плотности плазмы (а) и диамагнетизма (б) в соленоиде при различных способах напуска газа, нормированные на значение в максимуме: сплошная линия – без газа, точечная линия – напуск через трубку, пунктирная линия – напуск в газовую коробку

длина пробега ионов плазмы с энергией 250 эВ по перезарядке на такой мишени оценивается величиной  $\sim 20$  см. Трубка газонапуска расположена в пробочном отношении  $5/2$  относительно однородного магнитного поля в соленоиде, и локальная перезарядная мишень играет роль эффективной пробки, в которой теряются ионы, рассеивающиеся на соответствующий угол.

Для количественной оценки величины этих потерь необходимо знать распределение потенциала плазмы вдоль оси установки – работа, которую предстоит выполнить в ближайшее время. Качественно большие перезарядные потери согласуются с формой профиля ионного тока насыщения на зонд в области подачи газа (Рис.16а). Вблизи оси установки плазма может иметь достаточно большую плотность, но низкую ионную температуру, которая входит в ток на зонд как  $T_i^{0.5}$ .

Возможным механизмом, объясняющим повышенный темп роста плотности плазмы при использовании газовой коробки по сравнению с трубкой, может быть

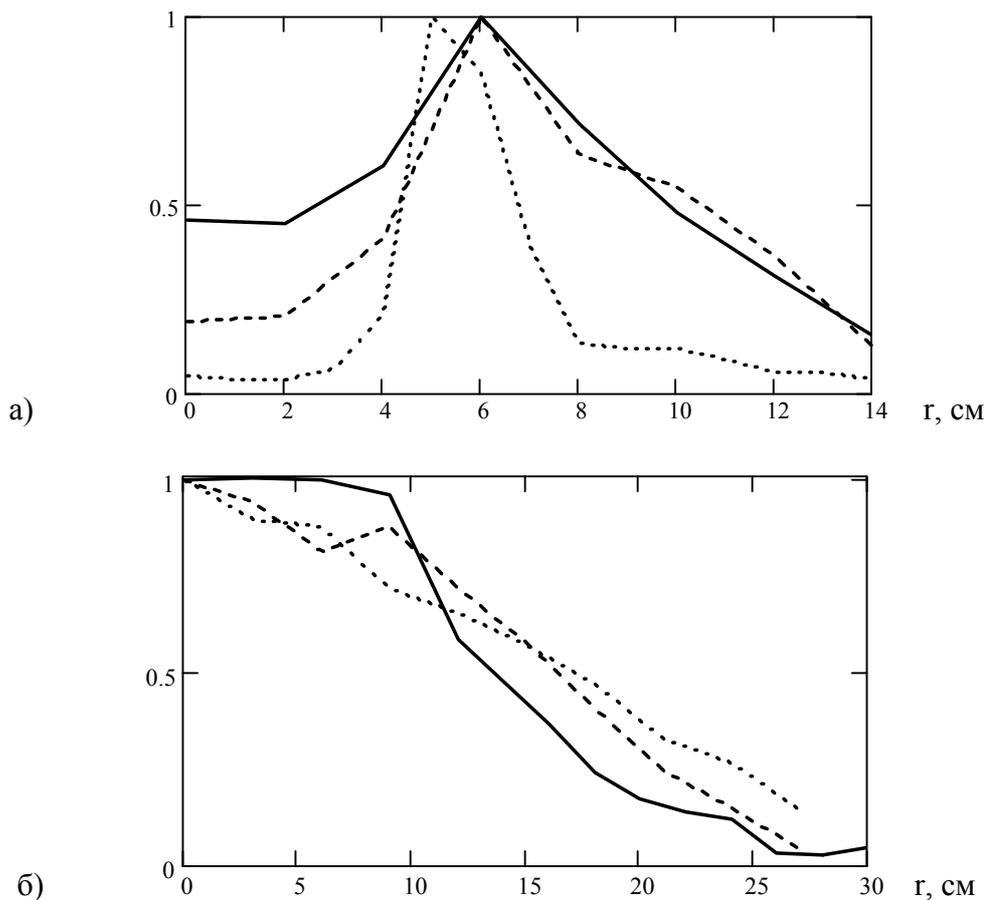


Рис.16. Профили ионного тока на зонд в области газонапуска  $Z=53$  см (а) и в центральной части соленоида  $Z=41$  см (б) при различных способах напуска газа, нормированные на значение в максимуме: сплошная линия – без газа, точечная линия – напуск через трубку, пунктирная линия – напуск в газовую коробку

рециклинг водорода с поверхности газовой коробки. Если предположить, что за время между выстрелами на хорошо очищенную поверхность коробки садится монослой частиц, то общее их количество может достигать величины  $\sim 10^{18}$ .

Рециклинг газа со стенки соленоида, безусловно, оказывает большое влияние на динамику накопления плазмы. Но в этом случае расстояние от стенки соленоида до плазменной границы  $\sim 30$  см, и водород со стенки попадает в плазму за время  $\sim 0.3$  мс. Оценим по порядку величины коэффициент рециклинга газа со стенки соленоида, пренебрегая временем пролета молекулы от стенки до плазменной границы. Возьмем для простоты режим работы без дополнительного напуска газа (Рис.6а). В этом случае рециклинг, определяется потоком на стенку быстрых атомов перезарядки. Вклад медленных франк-кондоновских атомов в рециклинг можно считать малым.

В нулевом приближении будем считать плотность газа в соленоиде неизменной. Поскольку за импульс пушки плотность газа в соленоиде меняется, возьмем среднюю величину  $\sim 2.5 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>. Средний по времени поток молекул на поверхность плазменного шнура

$$\frac{n_{\text{sol}} v_T S_{\text{pl}}}{4} \approx 7 \cdot 10^{21} \text{ с}^{-1}.$$

Этот поток разваливается на периферии плазмы в результате электронных соударений. Поток франк-кондоновских атомов в плазму составляет величину  $\sim 10^{22}$  с<sup>-1</sup>. Скорости перезарядки и ионизации медленных атомов примерно одинаковы, поэтому поток на стенку быстрых атомов перезарядки  $\sim 5 \cdot 10^{21}$  с<sup>-1</sup>. Плотность газа в соленоиде растет со скоростью

$$\frac{dn_{\text{sol}}}{dt} \approx \frac{\gamma \cdot 5 \cdot 10^{21}}{V_{\text{sol}}},$$

где  $\gamma$  - коэффициент рециклинга. Измеренная магниторазрядными манометрами скорость увеличения плотности газа в соленоиде составляет величину  $\sim 2 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup> с<sup>-1</sup>. Коэффициент рециклинга, оцененный из приближенного равенства

$$\frac{\gamma \cdot 2.5 \cdot 10^{21}}{V_{\text{sol}}} \approx 2 \cdot 10^{15},$$

составляет величину  $\sim 1.5$ . Такое количество молекул сбивает со стенки быстрый атом перезарядки.

При напуске газа  $\sim 100$  лТорр/с равновесная концентрация водорода в объеме газовой коробке  $\sim 5 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>, общее количество молекул  $\sim 3.5 \cdot 10^{17}$ . При выгорании этого вещества на начальной стадии накопления плазмы на стенку коробки

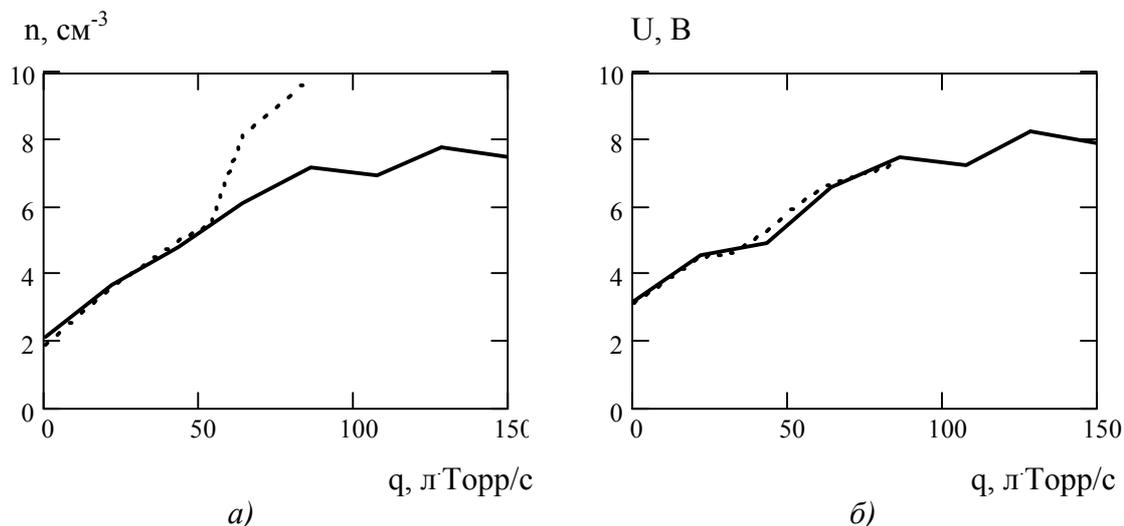


Рис.17. Зависимость плотности плазмы (а) и диамагнетизма (б) от темпа напуска газа при двух способах подачи:  
пунктирная линия – напуск через трубку, сплошная линия – напуск в газовую коробку

высаживается  $\sim 2.5 \cdot 10^{17}$  атомов перезарядки. Поэтому поверхность коробки очищается плазмой за время порядка времени выгорания водорода в объеме коробки  $\tau \sim 0.2$  мс. Так как коробка расположена близко к плазме и, в отличие от соленоида, не накапливает сбиваемый газ в зазоре между стенкой и плазмой, то время очистки поверхности коробки может быть меньше. Таким образом, рециклинг газа с поверхности коробки на начальной стадии заполнения соленоида плазмой может давать значительный вклад в темп накопления плотности.

Способ подачи газа практически не влияет на форму радиального профиля плотности плазмы в центральной части соленоида (Рис.16б). В обоих режимах газонапуска значительный прирост плотности происходит за счет газа из объема соленоида, поэтому профиль при дополнительном напуске газа на 3-4 см шире, чем профиль плотности плазмы, создаваемой только газоразрядным источником.

Различие в скорости роста плотности плазмы и диамагнетизма в течение импульса при двух способах подачи газа не влияет на установившиеся величины этих параметров (Рис.17). Процессы, приводящие к различию в скорости накопления плазмы, имеют короткие времена, и стационарная плотность в основном определяется потоком в плазму газа из соленоида, который одинаков в обоих случаях.

При работе газовой коробки стационарная плотность достигается быстрее, поэтому больше время существования мишенной плазмы, пригодной для нагрева инъекцией атомарных пучков. Можно сделать вывод, что использование газовой коробки является предпочтительным.

### Численная модель создания плазмы и напуска газа

Модель создания плазмы и напуска газа проиллюстрирована схематически на Рис.18. За основу для расчета взят метод из работы [20]. Модель является нульмерной, принято, что газ и плазма занимают весь интересующий объем. Взаимодействие газа с плазмой описывается уравнениями баланса частиц и энергии:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dn_{h2}}{dt} &= -n_{h2}n_e \langle \sigma_{ion\_h2} v_e \rangle - n_{h2}n_e \langle \sigma_{diss\_h2} v_e \rangle + Q_{h2} \\ \frac{dn_{h2+}}{dt} &= n_{h2}n_e \langle \sigma_{ion\_h2} v_e \rangle - n_{h2+}n_e \langle \sigma_{diss\_h2+} v_e \rangle \\ \frac{dn_0}{dt} &= -n_0n_f \langle \sigma_{ch\_ex} v_f \rangle - n_0n_e \langle \sigma_{ion\_h} v_e \rangle - \frac{n_0}{\tau_{ex}} + 2n_{h2}n_e \langle \sigma_{diss\_h2} v_e \rangle + n_{h2+}n_e \langle \sigma_{diss\_h2+} v_e \rangle \\ \frac{dn_s}{dt} &= n_0n_f \langle \sigma_{ch\_ex} v_f \rangle + n_0n_e \langle \sigma_{ion\_h} v_e \rangle + n_{h2+}n_e \langle \sigma_{diss\_h2+} v_e \rangle - \frac{n_s}{\tau_{n||s}} \\ \frac{dn_f}{dt} &= -n_0n_f \langle \sigma_{ch\_ex} v_f \rangle - \frac{n_f}{\tau_{n||f}} + Q_{i0} \\ \frac{d(n_s E_s)}{dt} &= n_0n_f \langle \sigma_{ch\_ex} v_f \rangle E_{n0} + n_0n_e \langle \sigma_{ion\_h} v_e \rangle E_{n0} + n_{h2+}n_e \langle \sigma_{diss\_h2+} v_e \rangle E_{n0} - \frac{n_s E_s}{\tau_{e||s}} + \\ &\quad + \beta_{es} (E_e - E_s) + \beta_{fs} (E_f - E_s) + P_{KH} \\ \frac{d(n_f E_f)}{dt} &= -n_0n_f \langle \sigma_{ch\_ex} v_f \rangle E_f - \frac{n_f E_f}{\tau_{e||f}} + \beta_{ef} (E_e - E_f) + \beta_{fs} (E_s - E_f) + P_{KH} + Q_{i0} E_{i0g} \\ \frac{d(n_e E_e)}{dt} &= n_0n_e \langle \sigma_{ion\_h} v_e \rangle (E_{e0} - I_{n0}) + \beta_{es} (E_s - E_e) + \beta_{ef} (E_f - E_e) + P_J + Q_{e0} E_{e0g} - Q_e \alpha E_e \end{aligned} \right.$$

Скорости ионизации электронами молекул  $\langle \sigma_{ion\_h2} v_e \rangle$  и атомов  $\langle \sigma_{ion\_h} v_e \rangle$

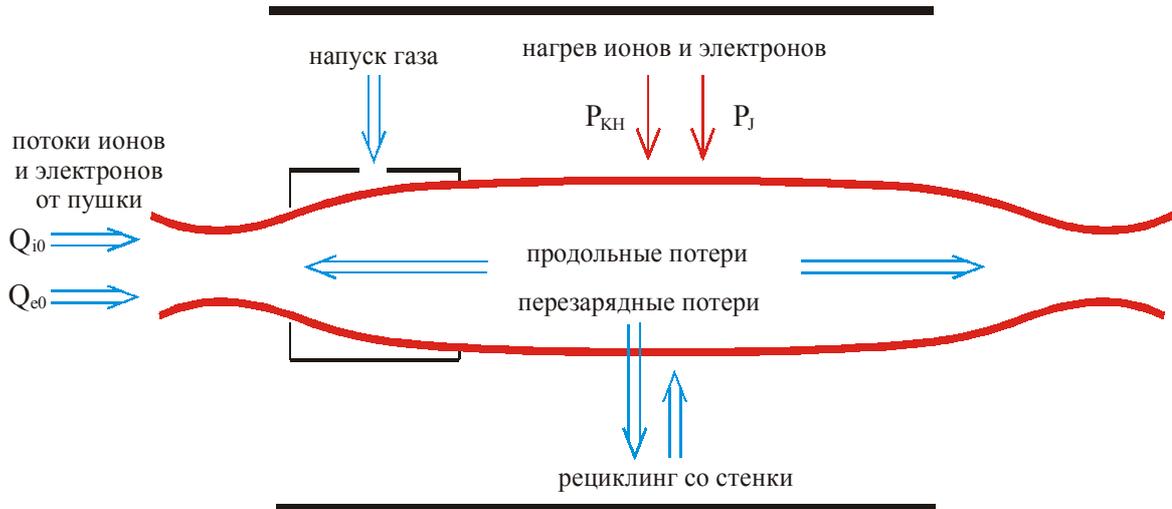


Рис.18. Схематическая модель создания плазмы и напуска газа

водорода, диссоциации молекул  $\langle \sigma_{\text{diss\_h2}} v_e \rangle$  и молекулярных ионов  $\langle \sigma_{\text{diss\_h2+}} v_e \rangle$ , а так же скорость резонансной перезарядки  $\langle \sigma_{\text{ch\_ex}} v_f \rangle$  взяты из справочника [21].

$Q_{\text{h2}}$  – поток молекул в газовую коробку. Для молекул и молекулярных ионов (плотности  $n_{\text{h2}}$  и  $n_{\text{h2+}}$ ) основными являются процессы с участием электронов. Образующиеся атомы водорода (плотность  $n_0$ ) считаются франк-кондоновскими с энергией 1+2 эВ. Атомы ионизируются электронами, и на них перезаряжаются горячие ионы основной плазмы.

Выделяются две популяции ионов – горячие ионы основной плазмы с плотностью  $n_f$ , энергией  $E_f$  и холодные ионы с плотностью  $n_s$ , энергией  $E_s$ , образованные ионизацией и перезарядкой.  $Q_{\text{i0}}$  – поток ионов от газоразрядного источника с температурой 50 эВ. Ионы рассеиваются в конус потерь за время  $\tau_{\text{n||}}$ . Классические продольные потери для адиабатической ловушки взяты из работы [22]:

$$\tau_{\text{n||}} = 0.53\tau_i (\ln R + \sqrt{\ln R})$$

$$\tau_{\text{e||}} = 1.38\tau_i \ln R, \text{ где } \tau_i = \frac{\sqrt{M}}{\sqrt{2}\pi e^4 \lambda} \cdot \frac{T_i^{1.5}}{n}$$

Без дополнительного напуска газа в соленоиде создается плазма с плотностью  $n \approx 1.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и температурой ионов  $T_i \approx 250$  эВ. Времена продольных потерь частиц и энергии в стационарном случае оцениваются как  $\tau_{\text{n||}} \approx 400$  мс и  $\tau_{\text{e||}} \approx 650$  мс. Тогда поток ионов через пробки  $\sim 3$  кА, мощность потерь  $\sim 500$  кВт.

Обе популяции ионов нагреваются неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца с темпом нагрева отдельной частицы  $R_{\text{KH}} \sim 0.5$  эВ/мкс [7]. Электроны нагреваются текущим по плазме продольным током с темпом нагрева  $R_j \sim 2$  эВ/мкс и от более горячих ионов за счет кулоновских столкновений. Плотность мощности передачи энергии между компонентами плазмы  $a$  и  $b$  рассчитывается по спитцеровским коэффициентам энергообмена

$$\beta_{ab} = \frac{(3/2)^{1/2} \cdot 4 \cdot (2\pi)^{1/2} e^4 \cdot n_a n_b \lambda_{ab}}{m_a m_b (E_a / m_a + E_b / m_b)^{3/2}}.$$

$Q_{\text{e0}}$  – потоки электронов от газоразрядного источника с температурой 15 эВ. В уравнении для электронной температуры учитывается, что на ионизацию атома затрачивается энергия, равная энергетической «цене» иона 30 эВ. Коэффициент  $\alpha$  определяет, сколько электронных температур уносит с собой покидающий плазму электрон.

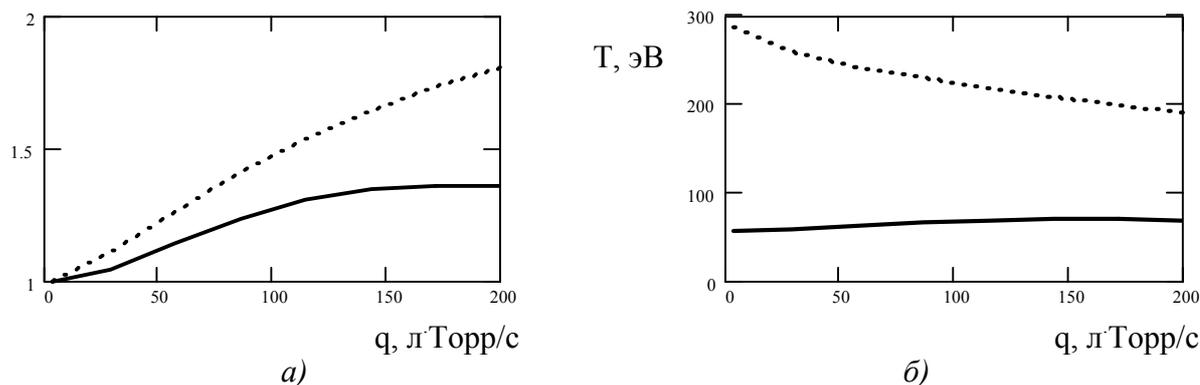


Рис.19. Расчет зависимости параметров плазмы от темпа напуска газа:  
 (а) относительное увеличение плотности плазмы (пунктирная линия) и диамагнетизма (сплошная линия)  
 (б) пунктирная линия – температура ионов, сплошная линия – температура электронов

Система уравнений решена численно в среде “MathCad”. Рассчитана зависимость плотности плазмы и диамагнетизма, а также температуры ионов и электронов от темпа напуска газа (Рис.19). Модель качественно согласуется с экспериментом, что говорит об адекватном описании взаимодействия плазмы и напускаемого газа. Отличие от эксперимента вызвано некорректным описанием рециклинга газа со стенок, тогда как роль рециклинга становится определяющей при

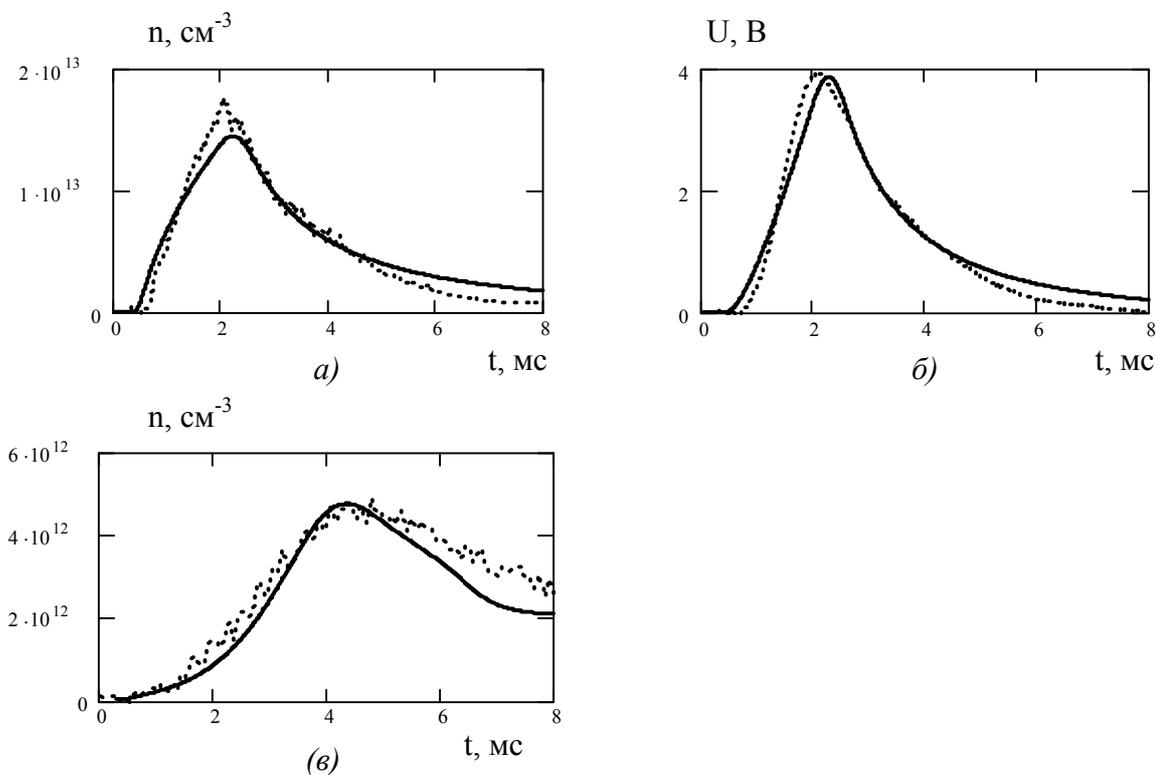


Рис.20. Временные зависимости плотности плазмы (а), диамагнетизма (б) и плотности газа в соленоиде (в) без дополнительной подачи газа: сплошная линия – численный расчет, пунктирная линия – эксперимент

увеличении количества газа, напускаемого в соленоид. В модели не учитывается рециклинг от относительно медленных ионов.

В отсутствие дополнительного напуска газа вклад рециклинга в плотность плазмы не более 30%. Этот режим работы рассчитывается моделью более точно (Рис.20), коэффициент рециклинга соответствует полученной ранее оценке  $\gamma \sim 1.5$ .

Для развития модели требуется экспериментальное уточнение величин:

- потенциала плазмы относительно пробок и радиального градиента электрического поля;
- распределения температур ионов и электронов вдоль оси установки;
- зависимости коэффициента рециклинга от времени.

## IV. Заключение

Для проведения экспериментов по дополнительной подаче водорода в плазму центрального соленоида подготовлены и установлены керамическая трубка для напуска газа, газовая коробка и импульсные магниторазрядные манометры.

Изучена динамика газа в установке при дополнительном напуске газа. Проведено моделирование распространения газа без плазмы написанной программой "CreatVac". Определены параметры плазмы в зависимости от способа подачи газа и темпа его напуска. Найдены оптимальные величины потока газа и времени работы клапана.

При подаче газа достигнуто увеличение плотности плазмы до  $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  при пропорциональном возрастании диамагнетизма. Полученная мишенная плазма пригодна для дальнейшего квазистационарного нагрева инжекцией атомарных пучков и путем ввода ВЧ-мощности.

## У. Литература

1. Рютов Д. Д. Открытые ловушки (пробкотроны, амбиполярные ловушки). Препринт ИЯФ 87-104.
2. Трубников Б. А. Теория плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1996.
3. Димов Г. И. Осесимметричная амбиполярная ловушка. Препринт ИЯФ 89-151.
4. Димов Г. И., Лысянский П. Б. Амбиполярная ловушка АМБАЛ-М. Физическое обоснование первой очереди. Препринт ИЯФ 86-102.
5. Димов Г.И., Иванов А.А., Росляков Г.В. Получение и исследование струи мишенной плазмы для открытой ловушки. Физика плазмы, 8 (1982) 970.
6. Кабанцев А.А., Таскаев С.Ю. Низкочастотная дрейфовая неустойчивость плазменной струи желобкового типа. Физика плазмы, 16 (1990) 700.
7. Кабанцев А.А., Таскаев С.Ю. О температуре ионов плазменной струи. Физика плазмы, 18 (1992) 635.
8. Кабанцев А. А., Рева В. Б., Соколов В. Г.. Получение горячей плазмы в квазистационарном дуговом разряде. Препринт ИЯФ 95-1.
9. Таскаев С. Ю. Особенности накопления горячей плазмы атомарными пучками в пробкотронах АМБАЛ. Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук.
10. Ахметов Т.Д. и др. Создание горячей стартовой плазмы в концевой системе АМБАЛ-М. Препринт ИЯФ 96-81.
11. K. Brau, R. S. Post, E. Sevillano. Gas injection system in the TARA central cell. American Vacuum Society Meeting. Austin, Texas. November 1985. P.A. Bagryansky,
12. Y. Nakashima, M. Shoji, K. Yatsu. Behavior of neutral-hydrogen and particle confinement on GAMMA-10 tandem mirror plasmas. Journal of Nuclear Materials, 241-243 (1997) 1011-1015.
13. A.N.Karpushov, A.A.Lizunov, V.V.Maximov, "Cold-gas Fueling Experiments in the Gas-Dynamic Trap". Ibid., p.1777-1780 (1999).
14. P.A. Bagryansky, E.D. Bender, A.A. Ivanov, A.N. Karpushov, S.V. Murakhtin, K. Noack, S. Krahl, S.Collatz. "Effect of fast Ti-deposition on gas recycling at the first wall and on fast ion losses in the GDT Experiment" Journal of Nuclear Materials, No.265, p.124-133 (1999).
15. Деревянкин Г. Е., Дудников В. Г., Журавлев П. А. ПТЭ, 5 (1975) 168

16. Бендер Е. Д., Чуприянов В. Е. Импульсный манометрический датчик на основе магниторазрядной ячейки. V Всесоюзное Совещание по диагностике высокотемпературной плазмы, Минск, 1990
17. А.С. Кривенко, В.И. Давыденко, А.А. Иванов, А.Н. Драничников.  
Моделирование нестационарного профиля нейтрального газа в инжекторе атомов водорода методом стохастической динамики. Препринт ИЯФ 2000- 70.
18. Лесняков Г. Г. Скорости реакций образования атомов и ионов в водороде и дейтерии. ВАНТ Сер. Термоядерный синтез, 1980, вып.1(5)
19. Ахметов Т. Д., Давыденко В. И. Измерение поперечного переноса горячей плазмы в центральном соленоиде АМБАЛ-М. XXIX Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС
20. Давыденко В. И., Кузьмин С. В. Численное моделирование создания стартовой плазмы в установке АМБАЛ-М. Препринт ИЯФ 91-48
21. Atomic data for controlled fusion research. Oak Ridge National Laboratory, Georgia Institute of Technology, Queens University; ORNL-5206(Vol.1,2),Dist. Category UC-20;(1977).
22. Пастухов В. П. Вопросы теории плазмы. Под ред. Б. Б. Кадомцева. М.: Атомиздат, 1984. Вып. 13.