

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
им. Г.И. Будкера СО РАН

А.В. Бурдаков, С.Г. Воропаев, В.С. Койдан  
С.В. Лебедев, К.И. Меклер, В.В. Поступаев

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЫ, СОЗДАВАЕМОЙ  
ДЛИННЫМ ЗАМАГНИЧЕННЫМ ПРЯМЫМ  
РАЗРЯДОМ В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ

ИЯФ 93-30

НОВОСИБИРСК  
1993

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЫ, СОЗДАВАЕМОЙ ДЛИННЫМ ЗАМАГНИЧЕННЫМ  
ПРЯМЫМ РАЗРЯДОМ В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ

А. В. Бурдаков, С. Г. Воропаев, В. С. Койдан, С. В. Лебедев,  
К. И. Меклер, В. В. Поступаев

Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск 630090, Россия

А Н Н О Т А Ц И Я

Описаны эксперименты по изучению параметров прямого разряда в водороде, используемого для приготовления предварительной (мишенной) плазмы на установке ГОЛ-3 для последующей инжекции в неё мощного релятивистского электронного пучка микросекундной длительности. Разряд зажигается между торцом длинной металлической камеры, находящейся в продольном магнитном поле, и специальным электродом, находящимся в спадающем магнитном поле на противоположном конце камеры. Приведены результаты измерений параметров плазмы при помощи электротехнических диагностик, интерферометра, томсоновского рассеяния, детекторов излучения плазмы, двойных ленгмюровских зондов. Обсуждаются механизм возникновения разряда, характеристики плазмы и пути расширения диапазона плотностей получаемой плазмы.

CHARACTERIZATION OF LONG MAGNETIZED LINEAR DISCHARGE  
IN A METALLIC CHAMBER

A.V.Burdakov, V.S.Koidan, S.V.Lebedev, K.I.Mekler,  
V.V.Postupaev, S.G.Voropaev

Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk 630090, Russia

ABSTRACT

The efficiency of a collective plasma heating by a 100 kJ microsecond electron beam on the GOL-3 device depends on the parameters of a preliminary created hydrogen plasma. The plasma column of 7 m length and 8 cm diameter is produced in a metallic chamber, placed in a 6 T magnetic field, by a linear discharge. The mechanism of discharge development and major plasma parameters are discussed.

The discharge is created between a high-voltage electrode placed in the relatively weak magnetic field at the device exit and thin metallic foil placed at the opposite end of vacuum chamber. The plasma density is basically determined by the initial hydrogen pressure and can be  $2 \cdot 10^{14} + 1.5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . The plasma parameters are measured by means of 3.39  $\mu\text{m}$  interferometers, double Langmuir probe, soft X-ray and VUV detectors, system of Thomson scattering, etc.

Initial volume ionization is shown to be produced by fast electrons, emitted from the surface of high-voltage electrode prior to breakdown. These electrons move along the magnetic force lines, thus stable discharge development in the long metallic chamber is observed. The detailed studies of the regime with  $5 \cdot 10^{14} + 2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  plasma (most favourable for the experiments on E-beam heating) were done. The plasma is shown to have the required uniformity and 2.5+3 eV temperature. The plasma with the ionization degree less than 100% was also studied in this regime.

© Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера

1. Введение

Увеличение параметров экспериментальных установок, предназначенных для изучения нагрева плазмы сильноточными релятивистскими электронными пучками, привело к необходимости пересмотра традиционно применявшихся в таких экспериментах схем создания предварительной плазмы. В установках первого поколения (см., напр., [1]) обычно использовался разряд типа Пеннинга (разряд с кольцевым анодом), зажигаемый в диэлектрической (кварц, стекло) камере. Увеличение энергозапаса пучка до величины масштаба 100 кДж потребовало перехода к металлической вакуумной камере. Кроме того, с увеличением магнитного поля резко увеличиваются трудности приготовления плазмы с однородной по сечению плотностью при помощи разряда типа Пеннинга.

Указанные обстоятельства привели к тому, что для первой очереди установки ГОЛ-3 (см. [2]) для приготовления предварительной плазмы было предложено использовать прямой разряд, зажигаемый между торцом металлической вакуумной камеры (выполненным из тонкой фольги) и специальным высоковольтным электродом, расположенным в спадающем магнитном поле на противоположном конце вакуумной камеры. Система создания предплазмы должна обеспечивать однородный плазменный столб со следующими параметрами: плотность  $10^{14} + 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , длина 7 м, диаметр 8 см, ведущее магнитное поле до 6 Т. Первые эксперименты по проверке работоспособности предложенной схемы были описаны в [3]. Аналогичная конфигурация использовалась также в экспериментах по транспортировке микросекундного релятивистского электронного пучка через плазму, находящуюся в метровом соленоиде, на установке У1-СПИН (эксперименты велись с гелиевой

плазмой и основные результаты по определению параметров разряда приведены в [4]). Набор диагностик в этой работе несколько отличался от диагностик, использованных в [3].

В настоящей работе приводятся новые данные, характеризующие разряд и создаваемую с его помощью предварительную плазму на установке ГОЛ-3.

## 2. Постановка эксперимента

Схема плазменной части установки представлена на рис. 1. Квазистационарное магнитное поле создается соленоидом длиной около 7 м и может достигать 6 Т в однородной части и 12 Т в одиночных концевых пробках. При достижении максимума магнитного поля с помощью прямого разряда создается предварительная плазма, в которую через тонкую фольгу 13 инжектируется релятивистский электронный пучок из генератора У-3. Пучок проходит через плазму, нагревает её и поглощается в калориметре. Основные системы установки описаны в работах [5-8].

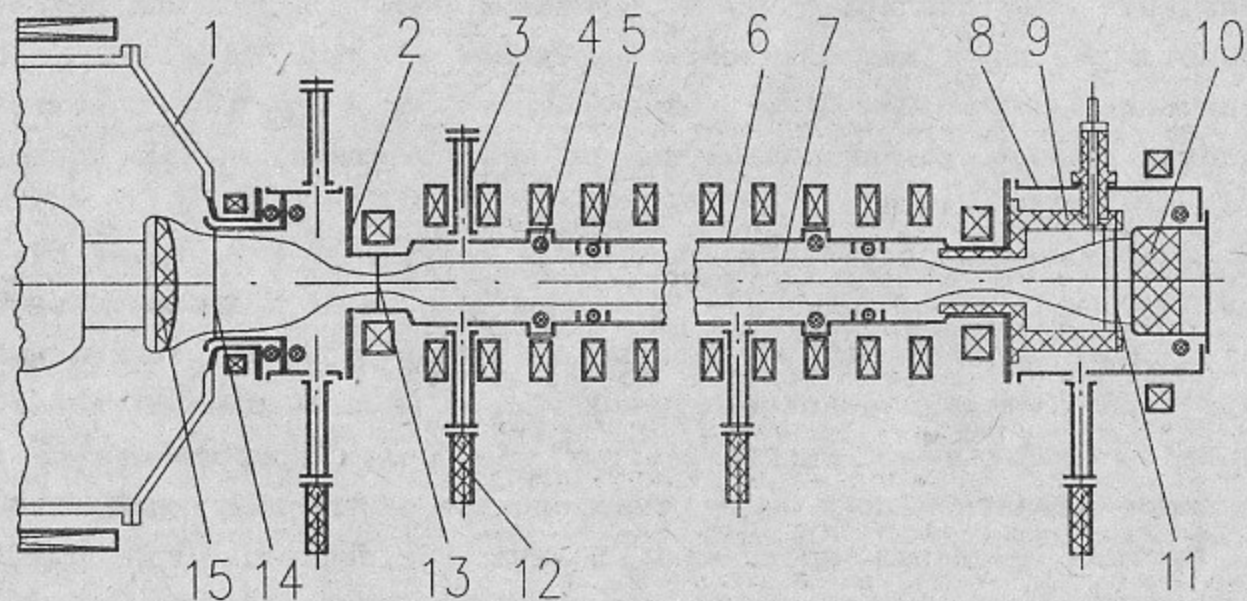


Рис. 1. Схема плазменной части установки ГОЛ-3. 1 - диодная камера генератора У-3; 2 - камера сжатия пучка; 3 - патрубок для напуска водорода; 4 - пояс Роговского; 5 - диамагнитный датчик и ограничивающие диафрагмы; 6 - вакуумная камера; 7 - граница электронного пучка; 8 - камера расширения пучка; 9 - узел создания предплазмы; 10 - калориметр; 11 - выходные фольги; 12 - гибкий вакуумный шланг; 13 - разделительная (входная) фольга; 14 - анодная фольга; 15 - катод генератора пучка.

Вакуумная камера функционально состоит из нескольких объемов, разделённых тонкими плёнками (фольгами) и находящихся при разном давлении. Камера между фольгами 11 и 13 заполняется водородом нужной концентрации, в остальных частях установки поддерживается давление от  $10^{-2}$  до  $10^{-3}$  Па. В момент максимума магнитного поля на высоковольтный электрод 11 подаётся напряжение отрицательной полярности и пробой происходит вдоль силовых линий магнитного поля на заземлённую фольгу 13. Основная часть вакуумной камеры длиной около 7 м представляет собой трубу из нержавеющей стали с внутренним диаметром 10 см. Через каждые 110 см внутри вакуумной камеры расположены ситалловые диафрагмы диаметром 8 см, ограничивающие апертуру разряда. Подробно устройство вакуумной камеры и системы создания предплазмы описано в [8].

На рис. 2 приведена более детальная схема выходного узла установки. Отметим две конструктивные особенности. Во-первых, высоковольтный электрод состоит из двух поверхностей: тонкой плёнки из

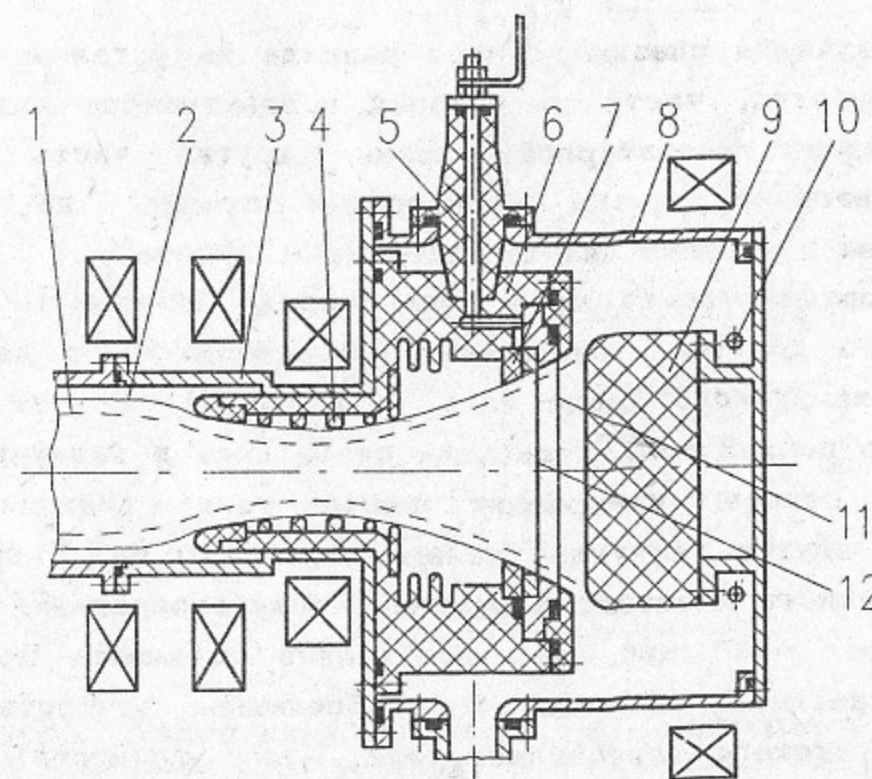


Рис. 2. Система создания предплазмы. 1 - граница электронного пучка; 2 - граница предварительной плазмы; 3 - вакуумная камера; 4 - графитовые диафрагмы; 5 - высоковольтный ввод; 6 - изолятор; 7 - керамическая диафрагма; 8 - вакуумный бак камеры расширения пучка; 9 - калориметр-приёмник пучка; 10 - пояс Роговского; 11 - вакуумно-плотная разделительная фольга; 12 - графитовая ткань.

алюминированного лавсана или полипропилена, расположенной с вакуумной стороны, и графитовой ткани, расположенной со стороны плазмы. Существенным является то, что графитовая ткань состоит из нитей толщиной в несколько микрон, что способствует развитию пробоя при подаче на ткань высокого напряжения. Во-вторых, в околоробочной области разряд ограничивается графитовыми диафрагмами, имеющими плавающий потенциал. Графитовые диафрагмы расположены на одной силовой линии с ситалловыми диафрагмами, находящимися внутри камеры. Расчётный диаметр электронного пучка несколько меньше и составляет 6 см в однородной части соленоида.

Напряжение на разряд прикладывается от конденсаторной батареи, коммутируемой игнитроном. В экспериментах в разных режимах использовались батареи ёмкостью от 3 до 170 мкФ на рабочее напряжение от 70 до 10 кВ.

### 3. Диагностики

Для изучения плазмы прямого разряда на установке существует набор диагностик, часть из которых предназначена специально для изучения низкотемпературной плазмы, другая часть служит для изучения нагрева плазмы электронным пучком, но может быть адаптирована и к более низким параметрам плазмы.

Электротехнические параметры разряда измеряются при помощи резистивного делителя напряжения, подключённого в месте высоковольтного вакуумного ввода (поз. 5 на рис. 2); пояса Роговского, измеряющего полный ток, втекающий от батареи в вакуумную камеру и нескольких поясов, измеряющих полные токи, текущие по плазме (размещены внутри вакуумной камеры через 110 см). Внутрикамерные пояса Роговского работают в режиме самоинтегрирования с собственным временем  $\approx 70$  мкс, что необходимо учитывать при обработке сигналов сравнимой длительности. Абсолютная точность калибровки поясов Роговского составляет  $\pm 1\%$ . Эта точность достигалась одновременной калибровкой всех поясов в следующих режимах: 1) калибровка медленно спадающим током, имеющим амплитуду  $\sim 1$  кА; 2) калибровка аperiодическим разрядом с амплитудой до 15 кА и разным временем затухания; 3) калибровка слабо затухающим разрядом с разным периодом. Проводилась также калибровка и с помощью

имитирующей плазму омической нагрузки с тождественной геометрией и сопротивлением при рабочем токе системы питания разряда. При всех калибровках ток, измеренный внутренними поясами, совпадал с током эталонного пояса Роговского другой конструкции (с внешним интегрированием) после внесения небольших поправок в индивидуальные расчётные коэффициенты чувствительности внутренних поясов. Внутри вакуумной камеры находятся также диамагнитные петли. Подробнее эти диагностики описаны в [8].

Плотность плазмы измеряется интерферометрами Майкельсона, работающими на длине волны 3.39 мкм. Оптическая схема интерферометра приведена на рис. 3. Станина интерферометра и все оптические элементы изготовлены из диэлектрических материалов для уменьшения влияния магнитного поля. Для оперативной подстройки начальной фазы интерферометра на пути опорного луча размещена барокамера 9.

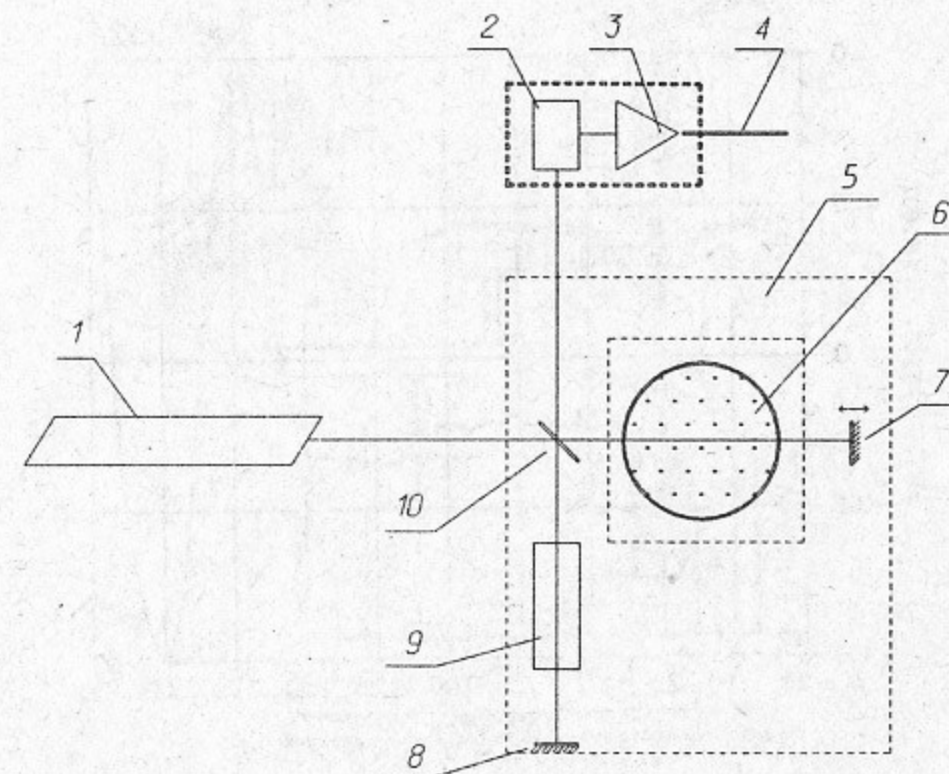


Рис. 3. Оптическая схема интерферометра. 1 - трёхволновой лазер; 2 - охлаждаемый фотоприёмник; 3 - усилитель-формирователь с преобразованием сигнала в свет; 4 - световод к системе регистрации; 5 - станина интерферометра; 6 - плазма; 7 - рабочее зеркало с пьезоэлектрическим калибратором; 8 - опорное зеркало; 9 - барокамера; 10 - светоделительная пластина.

Изменяя давление воздуха в этой барокамере и, тем самым, оптическую длину для опорного луча, можно выставить нужную рабочую точку интерферометра. Для увеличения точности обработки сигнала предусмотрена оперативная калибровка размаха интерференционной картины, записываемая одновременно с рабочим сигналом. Эта калибровка осуществляется тем, что после распада плазмы рабочее зеркало 7 быстро перемещается при помощи пьезоэлектрического корректора. В результате на сигнале получается характерная интерференционная картина, при помощи которой легко определяется временной ход плотности плазмы. Пример типичной интерферограммы в режиме получения плазмы малой плотности приведён на рис. 4 (первая часть сигнала связана с изменением плотности плазмы, а затем в момент времени около 150 мкс приводится в движение одно из зеркал интерферометра; получающаяся интерференционная картина используется для определе-

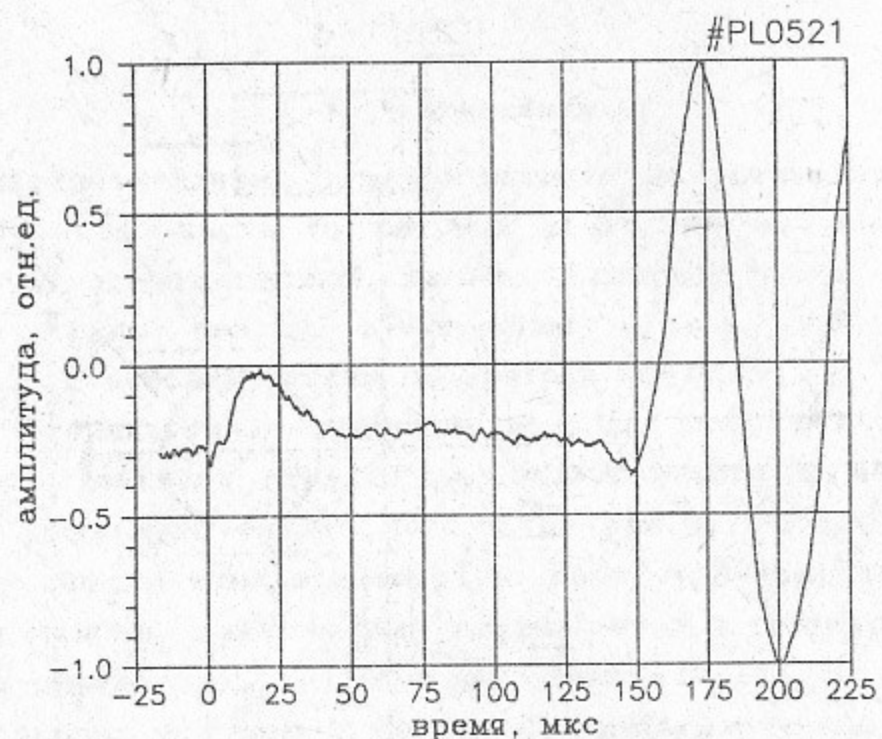


Рис. 4. Типичная интерферограмма при получении плазмы малой плотности (интерферометр работает в линейном режиме). Амплитуда сигнала нормирована на размах интерференционной картины. Часть сигнала до  $t = 135$  мкс (момент включения импульсной калибровки) рабочая, остальное служит для калибровки чувствительности и определения начальной фазы. Разряд включается в  $t = 0$ . Максимальная линейная плотность плазмы в этом разряде  $\int n \cdot dl = 1.3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , что соответствует средней плотности плазмы  $1.6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ .

ния амплитуды и начальной фазы интерферограммы). В интерферометрах используются трёхволновые гелий-неоновые лазеры типов ЛГН-113, ЛГ-126, позволяющие вести настройку интерферометра на видимом свете с длиной волны 0.63 мкм. В отдельных экспериментах интерферометр переводился на рабочую длину волны 1.15 или 0.63 мкм, при этом излучение вводилось в оптоволоконный кабель и передавалось в пульттовую, где регистрировалось при помощи фотодиода или ФЭУ [9]. На установке один интерферометр располагался вблизи от точки инжекции электронного пучка, второй - примерно в 150 см от выходной пробки.

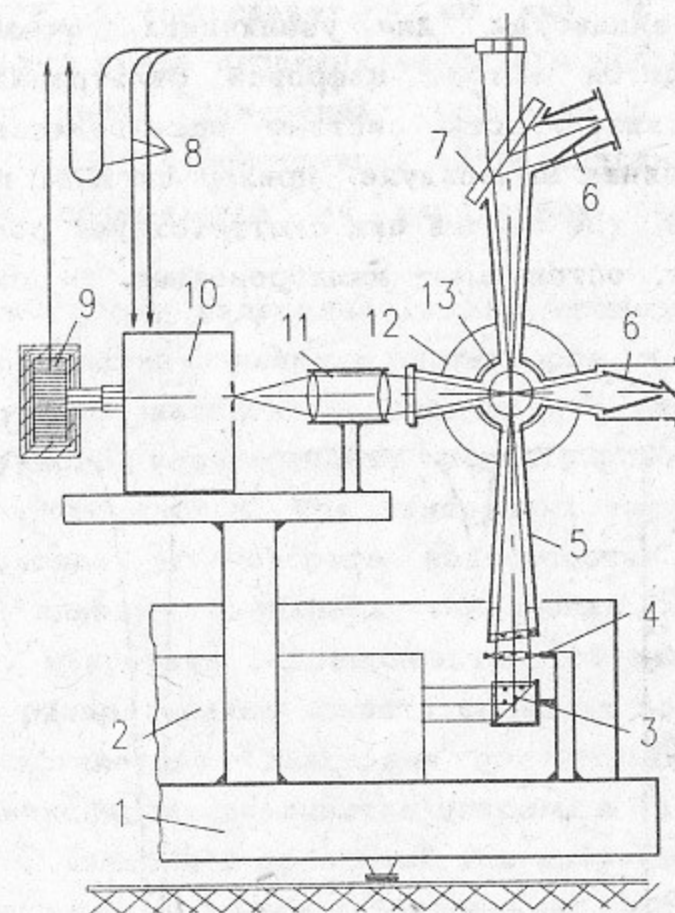


Рис. 5. Расположение системы томсоновского рассеяния на установке (показана плоскость, перпендикулярная вакуумной камере). Цифрами обозначены: 1 - силовая рама лазерной диагностики; 2 - рубиновый лазер; 3 - юстировочные призмы; 4 - фокусирующая линза; 5 - входной патрубок с диафрагмой; 6 - ловушка-поглотитель света; 7 - выходное стекло; 8 - калибровочные световоды; 9 - блок ФЭУ; 10 - полихроматор; 11 - объектив; 12 - катушка соленоида; 13 - вакуумная камера.

Для измерения плотности и температуры электронов плазмы на оси используется система  $90^\circ$  томсоновского рассеяния, подробно описанная в [10]. Луч рубинового лазера (20 Дж, 25 нс) пересекает плазму на расстоянии 270 см от входной фольги. Рассеянное излучение после объектива и полихроматора принимается на 8-канальный блок ФЭУ (см. рис. 5). Регистрация ведётся на АЦП с шагом 2 нс. Для калибровки чувствительности и линейности каждого канала в спектральный прибор заводился свет лазера при помощи длинных световодов, равномерно освещающих выходное окно полихроматора. Калибровочные импульсы имеют разную амплитуду и сдвинуты относительно сигнала рассеяния на 220 и 330 нс. Точная привязка сигнала к калибровочному импульсу по времени облегчает обработку сигналов малой амплитуды. Для увеличения точности обработки сигналов применяются методы цифровой фильтрации. Абсолютная калибровка чувствительности системы производится по сигналу рэлеевского рассеяния на воздухе. Пример сигнала при калибровке приведён на рис. 6, где первый пик соответствует рэлеевскому рассеянию на воздухе, остальные - калибровочные. В описываемых ниже

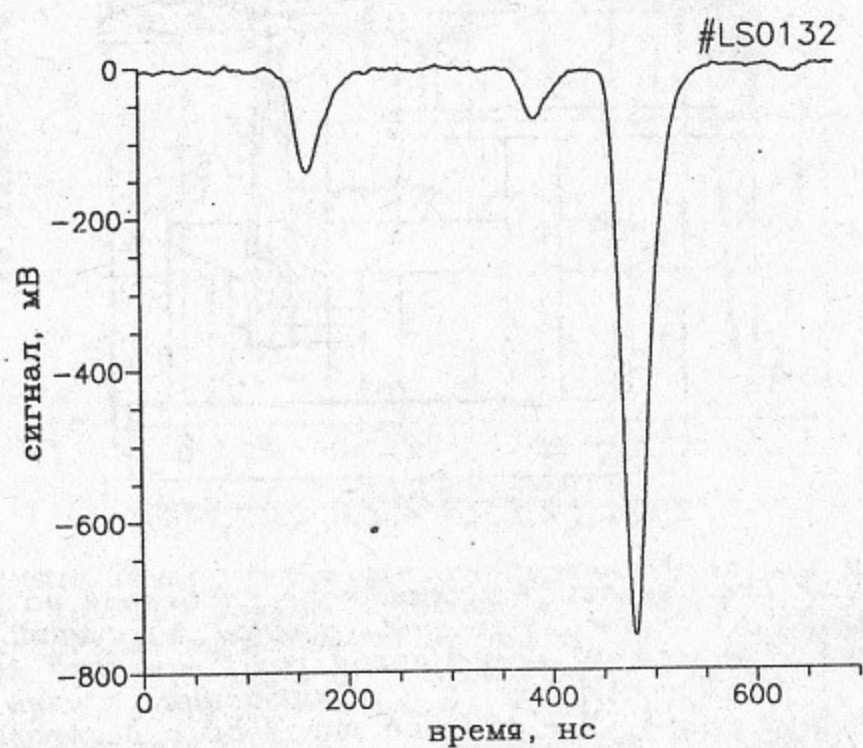


Рис. 6. Сигнал канала системы томсоновского рассеяния на несмещённой длине волны при калибровке чувствительности по рэлеевскому рассеянию на воздухе.

экспериментах в полихроматоре была установлена дифракционная решётка 1200 штрихов/мм, что при геометрической ширине канала 0.8 мм и линейной дисперсии 0.5 мм/нм даёт спектральную ширину канала 1.6 нм.

В первых экспериментах с плазмой на установке ГОЛ-3 проводились измерения параметров плазмы при помощи двойного ленгмюровского зонда. Гальваническая развязка зонда от вакуумной камеры осуществлялась при помощи аналоговой оптической линии связи (см. [9]). Особенностью методики является то, что для корректной обработки сигналов диаметр зонда должен быть меньше ларноровского радиуса ионов, который для водородной плазмы с температурой 3 эВ в магнитном поле 6 Т составляет  $\sim 40$  мкм. С другой стороны, минимальный диаметр зонда ограничивается его тепловым разрушением. Реально большая часть измерений проведена с зондом, имеющим диаметр 30 мкм. Подробно конструкция зонда описана в [11]. Большая часть измерений проводилась на расстоянии около 1 метра от выходной пробки.

Измерения жёсткого излучения плазмы проводились при помощи кремниевых поверхностно-барьерных детекторов и вакуумных фотодиодов с алюминиевым катодом. В стандартном режиме излучение в диапазоне вакуумного ультрафиолета регистрировалось непосредственно из плазменного столба. При измерениях излучения с энергией выше 1 кэВ, сигнал от которого недостаточен для его прямой регистрации, в плазму помещалась танталовая мишень, при этом регистрировалось излучение с поверхности этой мишени. Проводились также измерения распределения яркости свечения по радиусу плазмы в вакуумном ультрафиолетовом диапазоне при помощи камеры-обскуры. Подробности перечисленных диагностик описаны в [12].

Кроме этого, измерялся временной ход излучения плазмы в оптическом диапазоне как в узком спектральном интервале (системой регистрации томсоновского рассеяния в отладочном режиме), так и интегрально по спектру (фотодиодом). Проводились также измерения поперечных потерь энергии из плазмы при помощи быстрых пироэлектрических болометров.

#### 4. Электротехнические характеристики разряда

Условиям разряда на установке ГОЛ-3 соответствует, как уже указывалось в [3, 8], спадающая часть кривой Пашена. Это означает, что при фиксированном напряжении на разрядном промежутке пробой происходит, если давление превышает некоторую пороговую величину. На рис. 7 приведены типичные осциллограммы, характеризующие разряд, а также вычисленные по ним мощность разряда и разность между полным током разряда и током, текущим по плазме на всю длину разряда.

После подачи напряжения на высоковольтный электрод ток в течение некоторого времени отсутствует. Задержка между подачей напряжения и началом пробоя зависит, как и обычно в разрядах, от приложенного напряжения и давления водорода (см. рис. 8). После пробоя напряжение на разряде резко падает, его величина не превышает 1 кВ в типичных условиях (при этом напряжение зарядки батареи доходило до 40 кВ).

Плазменный ток измеряется поясами Роговского, расположенными в камере через 110 см. Форма и амплитуда этого тока, измеренная разными поясами, всегда одинакова. Это означает, что утечка тока на боковые стенки вакуумной камеры отсутствует в той её части, где проводятся измерения тока. Ближайший к узлу создания предплазмы пояс находится на расстоянии около 100 см от выходной пробки, дальний - на расстоянии 34 см от входной фольги<sup>1)</sup>.

По декременту затухания плазменного тока можно вычислить омическое сопротивление плазменного столба. Для учёта активного сопротивления остальных элементов цепи разряда были проведены специальные измерения с заземлением высоковольтного электрода разряда сразу после перехода в вакуум. Типичное значение полного сопротивления плазменного столба по электротехническим измерениям составляет  $0.2 \pm 0.3$  Ом. Ниже эта величина будет сравниваться с вычисленным по формуле Спитцера сопротивлением плазмы с измеренными параметрами.

<sup>1)</sup> В дальнейшем координата вдоль оси установки, обозначаемая X, будет отсчитываться от входной фольги, через которую производится инжекция электронного пучка. Высоковольтный электрод системы создания предплазмы расположен на  $X \approx 700$  см.

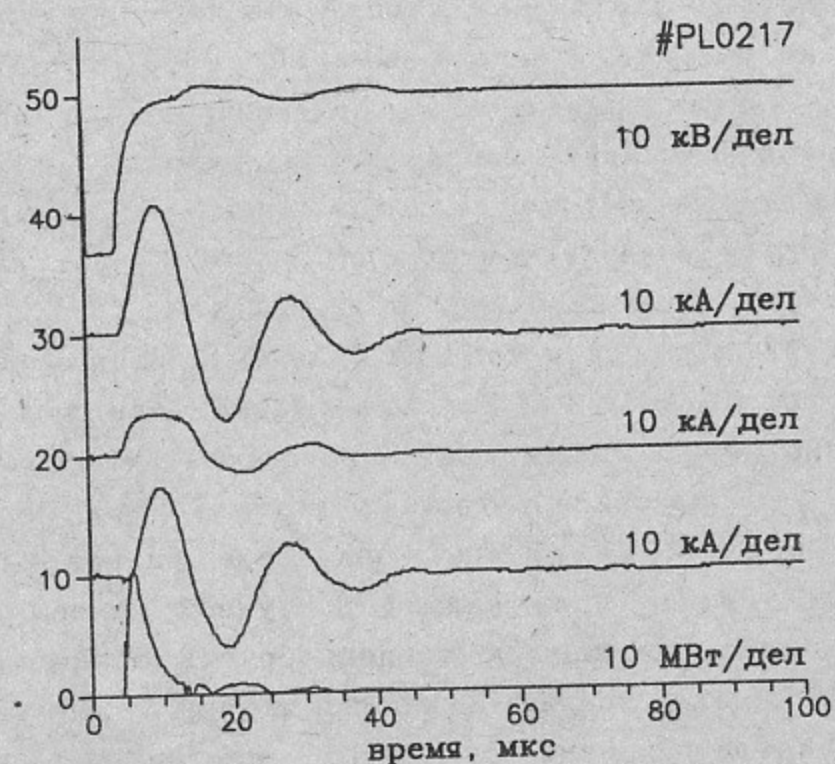


Рис. 7. Осциллограммы (сверху вниз) напряжения на разряде, полного тока разряда, плазменного тока. Приведены также разность между полным и плазменным токами и мощность, вкладываемая в разряд. Параметры разряда: давление водорода 2 Па, магнитное поле 4 Т, напряжение на батарее 14 кВ, ёмкость батареи 18 мкФ.



Рис. 8. Зависимость задержки пробоя от концентрации водорода для напряжения зарядки батареи 16 кВ (квадраты) и 18 кВ (звездочки).

Сравнивая указанное сопротивление плазменного столба с параметрами разряда, приведёнными на рис. 7, отметим, что в нашем случае во многих режимах импеданс токоподводов определяет полный ток и период колебаний. Напряжение на разряде определяется целиком его импедансом при токе, в значительной мере задаваемым внешней цепью. Обратим внимание на то, что разряд имеет импеданс, близкий к активному сопротивлению. Это видно из того, что максимумы напряжения на разряде и тока разряда находятся в фазе.

Амплитуда тока, текущего по плазме, как это видно из рис. 7, существенно меньше амплитуды полного тока, втекающего в вакуумную камеру. Это обстоятельство существует при любых параметрах разряда. На этом же рисунке приведена разность между полным и плазменным токами. При ревизии вакуумной камеры установки после большого числа разрядов в околопробочной области соленоида были обнаружены следы эрозии, указывающие на существование второго канала разряда (помимо основного, протекающего по всей длине вакуумной камеры вдоль магнитного поля). Побочный разряд горит поперёк магнитного поля между графитовой диафрагмой, наиболее вдвинутой в плазму (см. рис. 2) и ближайшим участком стенки вакуумной камеры. Этот разряд является стабильным и полностью воспроизводится в одинаковых условиях.

Наличие второго канала протекания тока объясняет активный характер импеданса разряда, поскольку индуктивность этой цепи невелика. В то же время заметен сдвиг по фазе между напряжением и плазменным током, возникающий из-за индуктивности системы разряд-вакуумная камера. Соотношение между полным током разряда и плазменным током изменяется при изменении параметров разряда. При повышении давления водорода ток, текущий по плазме, падает. Эта зависимость приведена на рис. 9. В то же время полный ток разряда от параметров плазмы не зависит, что и должно быть в случае, если он определяется внешней цепью. Фактически происходит перераспределение токов между двумя каналами разряда в соответствии с их импедансом. Заметим, что максимальная величина тока, текущего по плазме, не превышает предельного значения, при котором плазменный столб теряет устойчивость (см., напр., [13]).

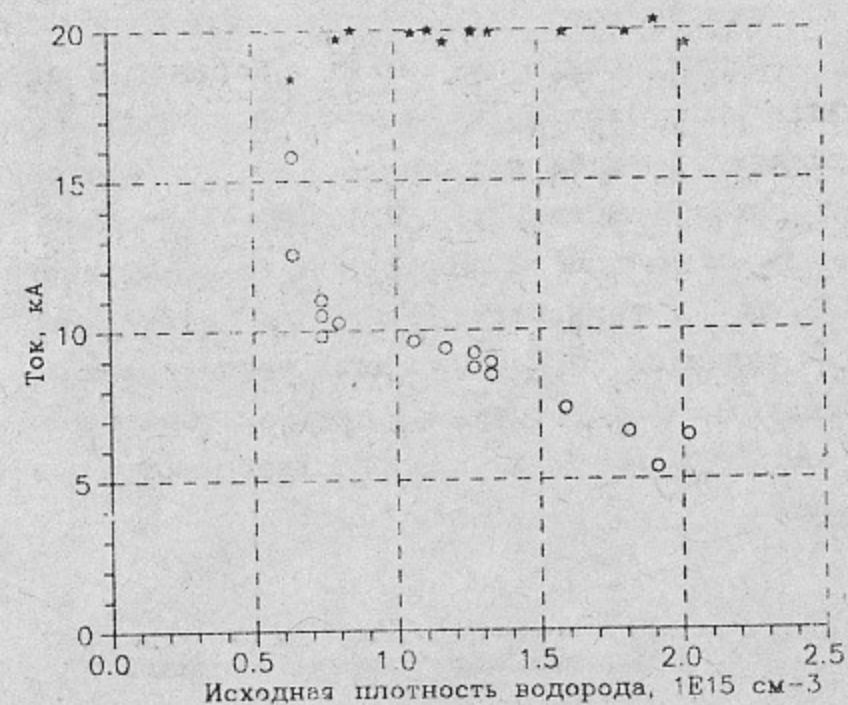


Рис. 9. Зависимость амплитуды полного (звёздочки) и плазменного (кружки) токов от концентрации водорода. Параметры разряда: ёмкость батареи 3 мкФ, магнитное поле 5.5 Т, напряжение зарядки 18 кВ.

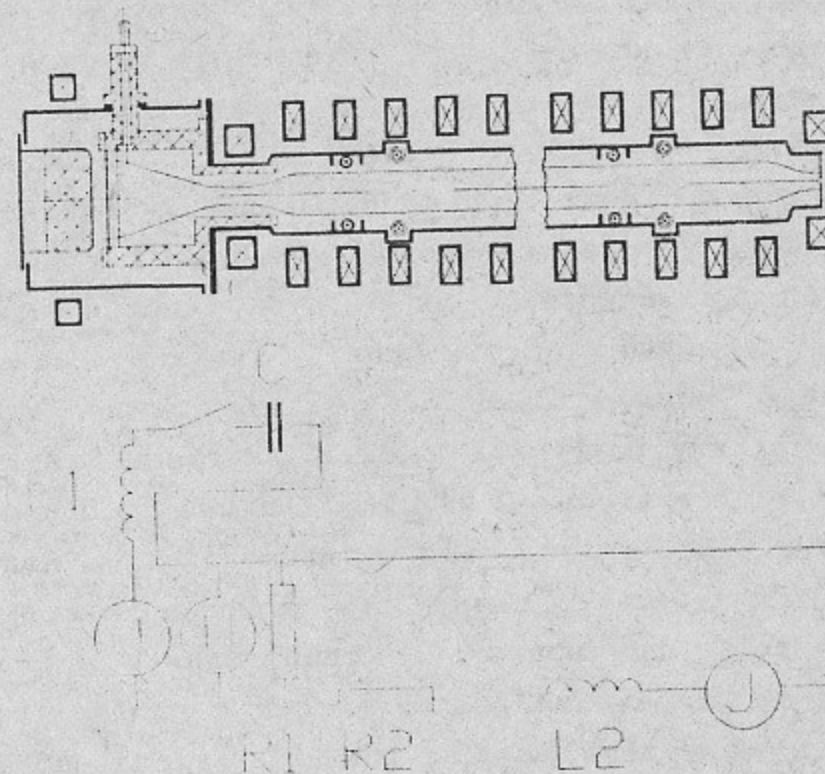


Рис. 10. Эквивалентная схема разряда.  $L1$  - индуктивность токоподвода,  $L2$  - плазменного столба,  $R1$  и  $R2$  - сопротивления паразитного и основного каналов разряда. Показаны места измерения параметров разряда.



Исходя из изложенного, можно привести эквивалентную схему цепи разряда, представленную на рис. 10. Параметры элементов цепи можно вычислить из осциллограмм рис. 7. Для этих условий сопротивление плазменного столба равно  $\sim 0.3 \text{ Ом}$  (в пренебрежении приэлектродным падением напряжения). В качестве примера для сравнения приведём классическое сопротивление плазменного столба с плотностью  $10^{15} \text{ см}^{-3}$  и температурой 2.5 эВ. Этот режим, как будет указано ниже, является основным для экспериментов по нагреву плазмы микросекундным электронным пучком. Спитцеровское сопротивление составляет 0.18 Ом в случае однородного протекания тока по сечению плазмы.

### 5. Динамика образования плазмы

Измерения показывают, что образование плазмы начинается в момент появления тока. Важным свойством разряда является то, что он развивается по всему сечению плазменного столба и распространяется вдоль силовых линий магнитного поля. В подтверждение этого можно привести следующее наблюдение. При всех условиях экспериментов совпадали токи разряда, измеренные поясами Роговского, расположенными в различных точках по длине установки. Сравним этот факт с приведённым на рис. 11 случаем, когда токи были зарегистрированы для разряда с нештатным срабатыванием магнитной системы. В этом случае часть катушек соленоида в районе  $X = 400+500 \text{ см}$  была обесточена и напряжённость поля на этом участке упала с 4 Т до 1.8 Т. Соответственно, трубка поля, имеющая диаметр 8 см в нормальном поле, должна была бы расширяться до 11.9 см, т.е. замкнуться на стенку вакуумной камеры, внутренний диаметр которой равен 10.2 см. Действительно, из рис. 11 видно, что амплитуда тока, прошедшего на  $X = 232 \text{ см}$  и дальше, в несколько раз меньше, чем ток на  $X = 562 \text{ см}$ . Для сравнения на том же рисунке приведены осциллограммы токов при нормальном срабатывании в том же режиме. Видно, что из-за сокращения индуктивности и сопротивления пути до боковой стенки вакуумной камеры ток разряда до области слабого поля превышает нормальный, в то же время ток в дальней от узла создания предплазмы части вакуумной камеры меньше обычного примерно в 2.2-2.3 раза. Эта величина близка к ожидаемому ослаблению

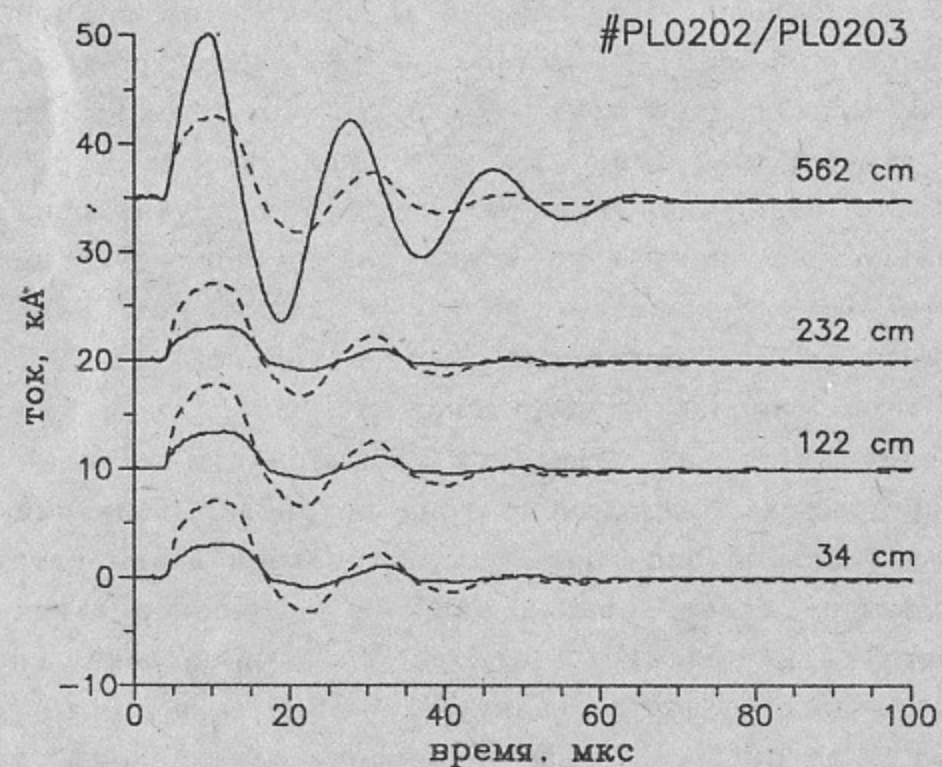


Рис. 11. Ток, текущий по плазме, измеренный в разных точках по длине вакуумной камеры при аномальном срабатывании магнитной системы (на участке между поясами Роговского 562 см и 232 см поле было уменьшено до 1.8 Т). Для сравнения приведён нормальный разряд в тех же условиях (пунктир).

тока для данной конфигурации магнитного поля и однородной плотности тока в разряде (в предположении, что диаметр разряда ограничен расположенной на  $X = 450 \text{ см}$  диафрагмой с апертурой 8 см).

Приведённые выше факты, а именно зависимость параметров и динамики разряда от давления, поведение разряда в аварийных ситуациях, наличие стабильного и повторяющегося плазменного тока в условиях существования мощного побочного околопробочного разряда, указывают на то, что важную роль играет стадия образования начальной ионизации плазменного столба. Поскольку до пробоя на высоковольтном электроде (графитовой ткани, состоящей из нитей толщиной в несколько микрон) удерживается высокий потенциал, то этот электрод должен служить эмиттером электронов с энергией, близкой к приложенному напряжению. Эти электроны, двигаясь вдоль силовых линий магнитного поля, производят первоначальную ионизацию водорода до степени, достаточной для развития разряда.

Такой механизм развития разряда естественным образом объясняет то, что разряд развивается в металлической камере большого

удлинения, на большей части которой электрическое поле высоковольтного электрода практически равно нулю. Электроны приобретают свою энергию вблизи электрода, поэтому полная длина установки на начальную стадию развития разряда практически не оказывает влияния. После того, как произошёл пробой, дальнейшая ионизация плазмы и разнос потенциала по длине плазменного столба обеспечиваются протекающим по плазме током. Околопробочный канал разряда развивается позднее, причинами его возникновения могут стать ультрафиолетовая подсветка от основного разряда и пристеночная плазма, появляющаяся на графитовых диафрагмах и имеющая в первые мгновения протекания плазменного тока потенциал, близкий к потенциалу высоковольтного электрода (из-за большой длины установки).

Для проверки существования эмиссии высокоэнергичных электронов с поверхности графитовой ткани была проведена специальная серия экспериментов. Внутри вакуумной камеры в месте установки рентгеновских детекторов была помещена заземлённая танталовая мишень. Мишень была расположена под углом  $45^\circ$  к оси установки для того, чтобы можно было регистрировать излучение с её поверхности. Излучение принималось четырёхканальным кремниевым поверхностно-барьерным детектором, имеющим фильтры 8, 16, 30 и 60 мкм бериллия (энергии отсечки фильтров от 0.9 до 1.8 кэВ). Детектор регистрировал излучение из области мишени эллипсоидальной формы с осями 35 и 50 мм. Сигналы детектора приведены на рис. 12. Следует учесть, что кроме тормозного излучения вклад в сигнал даёт линейчатое излучение L-серии (энергии фотонов от 7 до 12 кэВ) и M-серии тантала (1.3 - 2.3 кэВ). Видно, что существует заметный уровень сигнала до пробоя, затем амплитуда сигнала уменьшается более чем на порядок. Амплитуда сигнала практически не зависит от толщины указанных фильтров, что указывает на то, что излучение образуется электронами с энергией не менее 10 кэВ (в противном случае в сигнале была бы велика доля низкоэнергичной части тормозного излучения и излучения M-серии, которые поразному бы ослаблялись указанными фильтрами). Таким образом, рентгеновскими измерениями зарегистрированы высокоэнергичные электроны, рождающиеся на начальной стадии формирования разряда до полного пробоя.

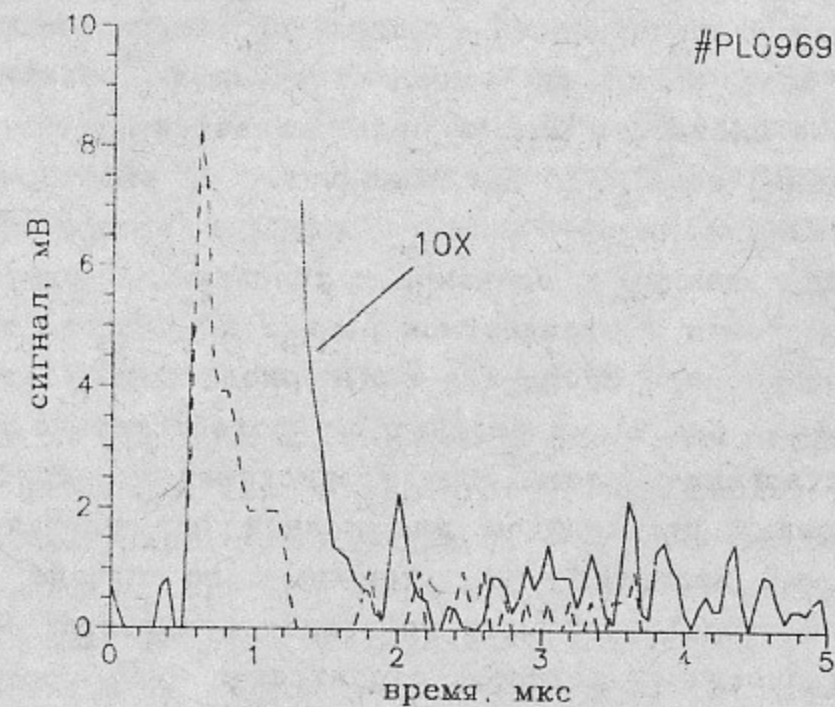


Рис. 12. Рентгеновское излучение с поверхности танталовой мишени.

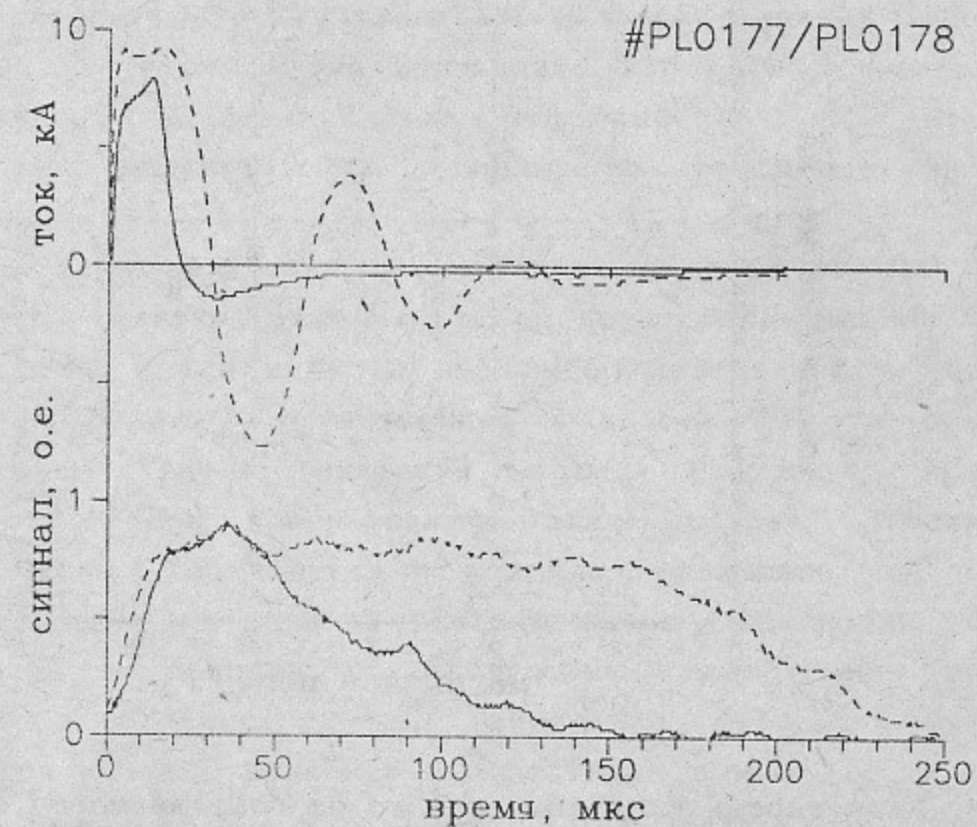


Рис. 13. Динамика плотности плазмы во времени при нормальном срабатывании разряда (пунктир) и при раннем прекращении тока (сплошная линия).

При сравнительно низкой исходной плотности водорода и большом плазменном токе время до полной ионизации сравнимо с периодом тока, а далее плотность плазмы поддерживается в течении всего времени протекания тока. Это наглядно видно из рис. 13, где приведены осциллограммы плазменного тока и сигнала интерферометра в двух разрядах, проведённых в одинаковых условиях. В одном разряде ток по плазме протекал в стандартном режиме до полного затухания, а в другом - прекратился на первом полупериоде в результате пробоя на калориметр (см. рис. 2), в результате соответственно меньшим было и время существования плазмы. При возрастании исходной концентрации водорода время, необходимое для полной его ионизации, увеличивается. Из-за падения тока, текущего по плазме (см. рис. 9), начиная с некоторой плотности ионизация становится неполной и при ещё большей плотности водорода стремится к нулю.

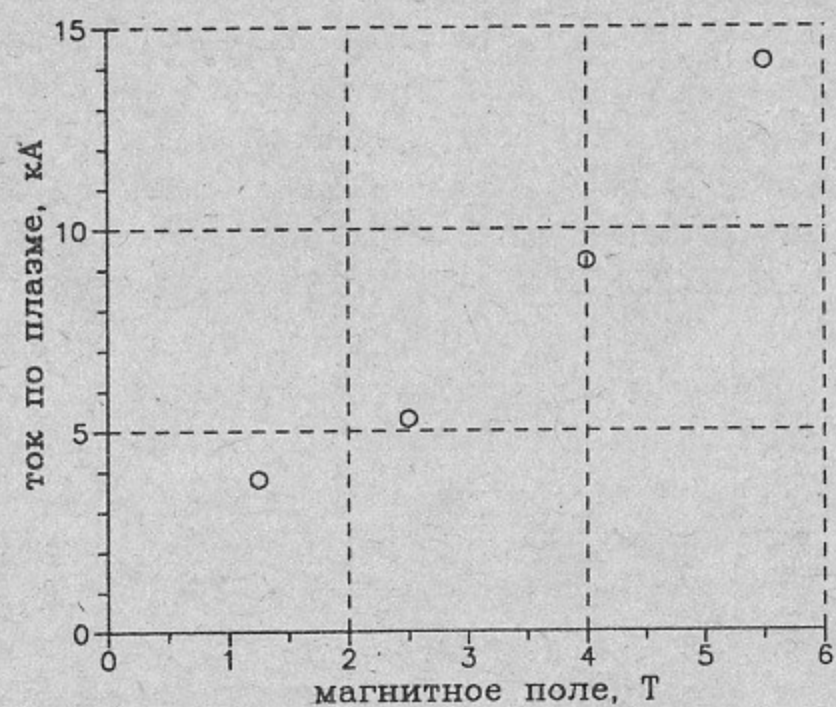


Рис. 14. Зависимость плазменного тока от напряжённости магнитного поля в соленоиде. Параметры разряда: ёмкость батареи 18 мкФ, напряжение зарядки 16 кВ, давление водорода 0.7 Па.

С изменением магнитного поля в соленоиде параметры разряда также изменяются. С ростом поля происходит увеличение плазменного тока и параметров плазмы при прочих равных условиях (см. рис. 14). Причиной такой зависимости может служить замедление развития околопробочного пробоя с ростом поля. При этом плазма основного разряда успевает приобрести большую плотность и температуру, что улучшает в дальнейшем соотношение импедансов двух каналов разряда.

#### 6. Увеличение максимальной плотности плазмы

Как видно из рис. 9, при увеличении исходного давления водорода в камере плазменный ток уменьшается. Это приводит к тому, что при фиксированном напряжении зарядки батареи существует максимальная плотность плазмы, которую можно получить в разряде. Увеличение напряжения ограничивается электрической прочностью изоляции и появлением вероятности пробоя "назад", на приёмник пучка.

Переход к получению плазмы с большей концентрацией возможен при изменении электротехнических параметров разряда. Как видно из предыдущего обсуждения, для этого необходимо увеличить амплитуду тока, текущего по плазме, и увеличить время протекания этого тока до величины, достаточной для ионизации. Это можно сделать, если увеличить ёмкость батареи разряда, что приводит к относительному снижению роли индуктивности токоподвода в полном импедансе разрядной цепи.

Кроме батареи ёмкостью 3 мкФ на напряжение до 100 кВ, на установке были смонтированы и испытаны две дополнительные батареи 17.3 мкФ, 50 кВ и 168 мкФ, 10 кВ. Выбор конкретной батареи для подключения к разряду осуществлялся в зависимости от требуемой концентрации и степени ионизации плазмы. На рис. 15 приведены плазменные токи при использовании этих батарей. Максимальная плотность плазмы, достигнутая в разряде, превышала  $10^{16}$  см<sup>-3</sup>. В качестве примера на рис. 16 приведена осциллограмма сигнала интерферометра в разряде со следующими параметрами: давление водорода 15 Па, батарея 168 мкФ, напряжение 7 кВ, магнитное поле 5.5 Т. В этом разряде линейная плотность плазмы, достигаемая к моменту  $t = 250$  мкс, составляет  $\int n \cdot dl = 1.4 \cdot 10^{17}$  см<sup>-2</sup>, что соответствует средней по диаметру 8 см плотности  $1.7 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>.

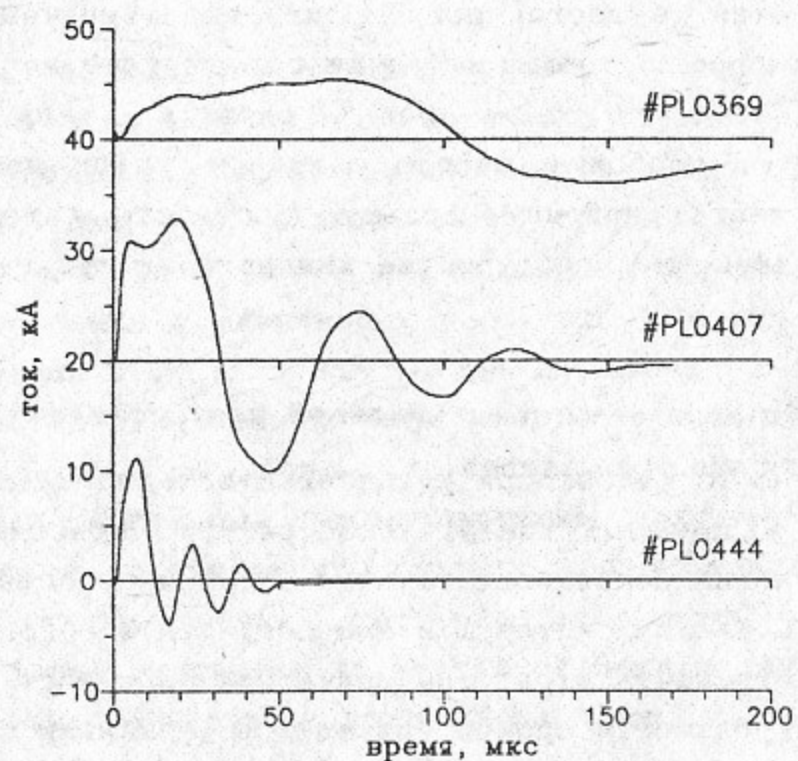


Рис. 15. Токи разряда с различными конденсаторными батареями (сверху вниз: 168 мкФ, 7 кВ; 18 мкФ, 21 кВ; 3 мкФ, 25 кВ).

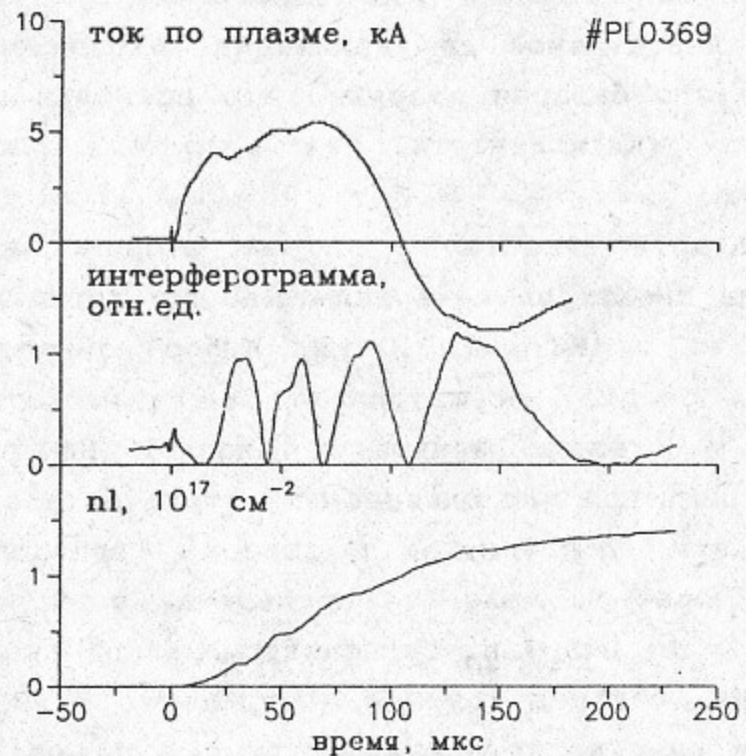


Рис. 16. Интерферограмма при большой плотности плазмы и её расшифровка.

## 7. Параметры плазмы

Остановимся более подробно на измерениях характеристик разряда в случае получения плазмы с плотностью  $(0.7 \pm 2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Такая плотность благоприятна для проведения экспериментов по пучковому нагреву плазмы. При этой плотности происходит эффективный нагрев плазмы за счёт развития пучковой неустойчивости, при этом пучок эффективно взаимодействует с плазмой и передаёт ей свою энергию. Предварительная плазма с указанной плотностью использовалась в большей части экспериментов на установке ГОЛ-3, описанных в работах [14, 15], поэтому этот режим изучался наиболее детально.

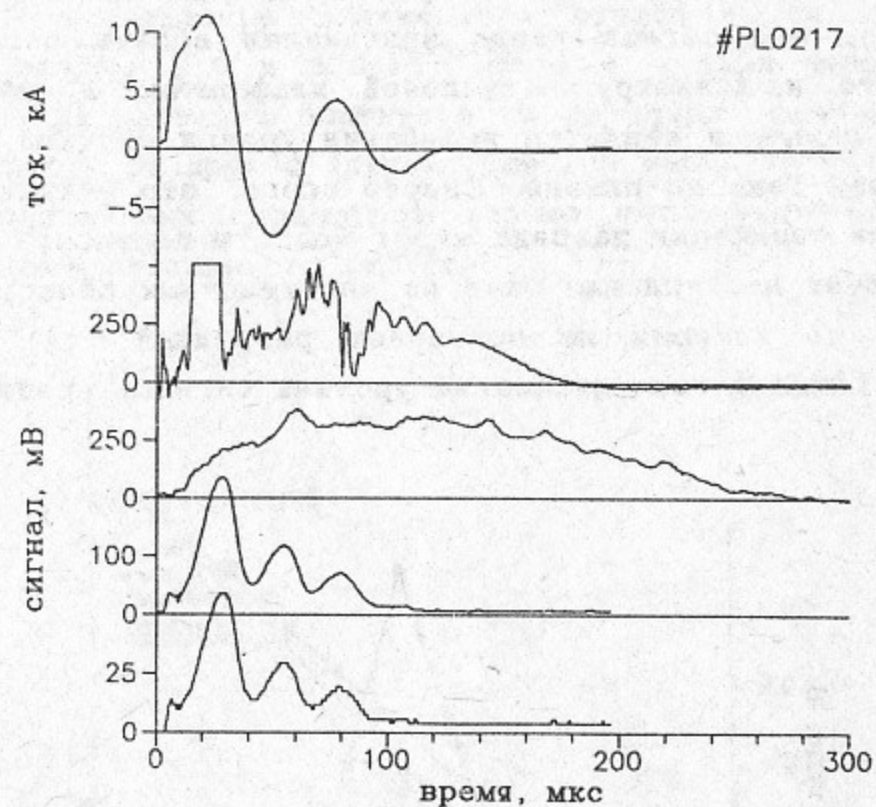


Рис. 17. Осциллограммы сигналов: ток разряда, двойной Ленгмюровский зонд, интерферометр, мягкое рентгеновское излучение плазмы, вакуумный ультрафиолет. Параметры разряда как на рис. 7.

На рис. 17 приведены осциллограммы сигналов, зарегистрированные в одном разряде. Как уже отмечалось выше, при сравнительно невысокой плотности плазмы наработка плазмы до полной ионизации происходит уже на первом периоде тока. Сигнал двойного ленгмюровского зонда на этой фазе развития разряда повторяет сигнал интерферометра. Затем измеренная интерферометром плотность плазмы остаётся постоянной до тех пор, пока по ней течёт ток, после чего

начинается распад плазмы. На сигнале двойного ленгмюровского зонда в большинстве случаев заметны колебания, максимумы которых совпадают с максимумами тока, что при постоянной плотности плазмы указывает на повышение её температуры при протекании тока. Детекторы мягкого рентгеновского и вакуумного ультрафиолетового излучения, сигналы которых также приведены на рис. 17, были без фильтров, и излучение наблюдалось непосредственно из плазменного столба. На этих сигналах также видны максимумы, совпадающие с максимумами плазменного тока.

В описанном режиме проводилось измерение зависимости сигнала двойного ленгмюровского зонда от расстояния до оси установки. Из рис. 18 видно, что сигнал зонда максимален вблизи расстояния от оси, близкого к диаметру ситалловой диафрагмы. В этой области также более сильными являются колебания уровня сигнала, связанные с прохождением тока по плазме. Скорее всего, это указывает на то, что плазма на периферии разряда имеет большую плотность (возможно, также и за счёт поступления газа из пристеночных областей вакуумной камеры, по которым не протекает разрядный ток). В случае перемещения зонда в тень диафрагмы уровень сигнала резко падает.

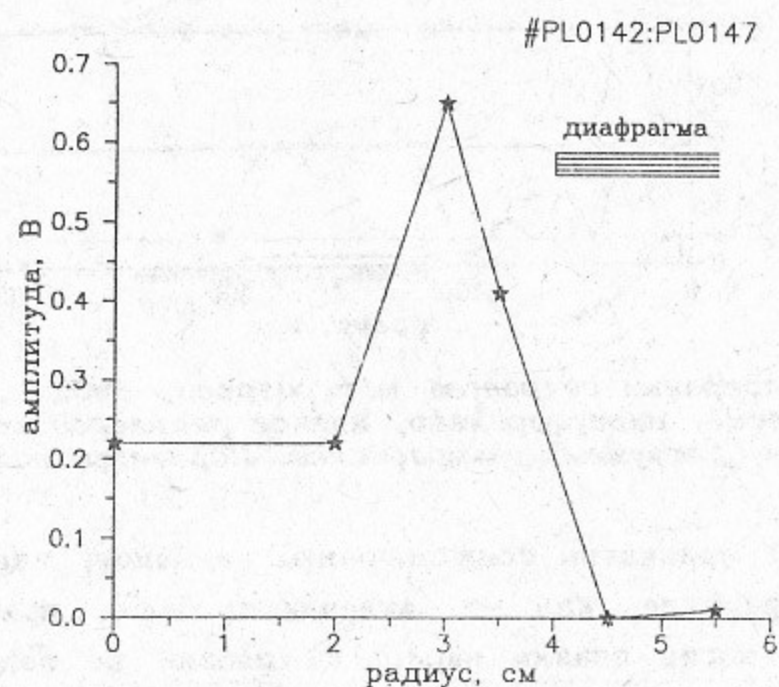


Рис. 18. Зависимость амплитуды сигнала двойного ленгмюровского зонда от расстояния до оси установки. Параметры разряда: ёмкость батареи 3 мкФ, зарядное напряжение 31 кВ, магнитное поле 4 Т, давление водорода 3 Па.

Оценка температуры плазмы по вольт-амперной характеристике зонда даёт её значение в центре камеры около 3 эВ к моменту прекращения разрядного тока.

Температура плазмы в центре камеры измерялась также системой  $90^\circ$  томсоновского рассеяния. На рис. 19 приведён типичный спектр рассеянного излучения, полученный через 60 мкс после начала разряда. Измеренные плотность и температура плазмы равны  $0.7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и 2.7 эВ. Для сравнения, концентрация, вычисленная по исходному давлению водорода, составляет  $1.0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . В этом же разряде измеренные двумя интерферометрами, расположенными на  $X = 50$  и 470 см, линейные плотности плазмы составляют  $0.9 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  и  $1.1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ , что при диаметре плазменного столба 8 см даёт среднюю плотность плазмы  $1.1$  и  $1.4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . С учётом данных зондовых измерений о подрастании плотности на периферии плазмы эти данные хорошо согласуются друг с другом. Ещё раз напомним, что полученные значения плазменных параметров хорошо согласуются с измеренным сопротивлением плазменного столба.

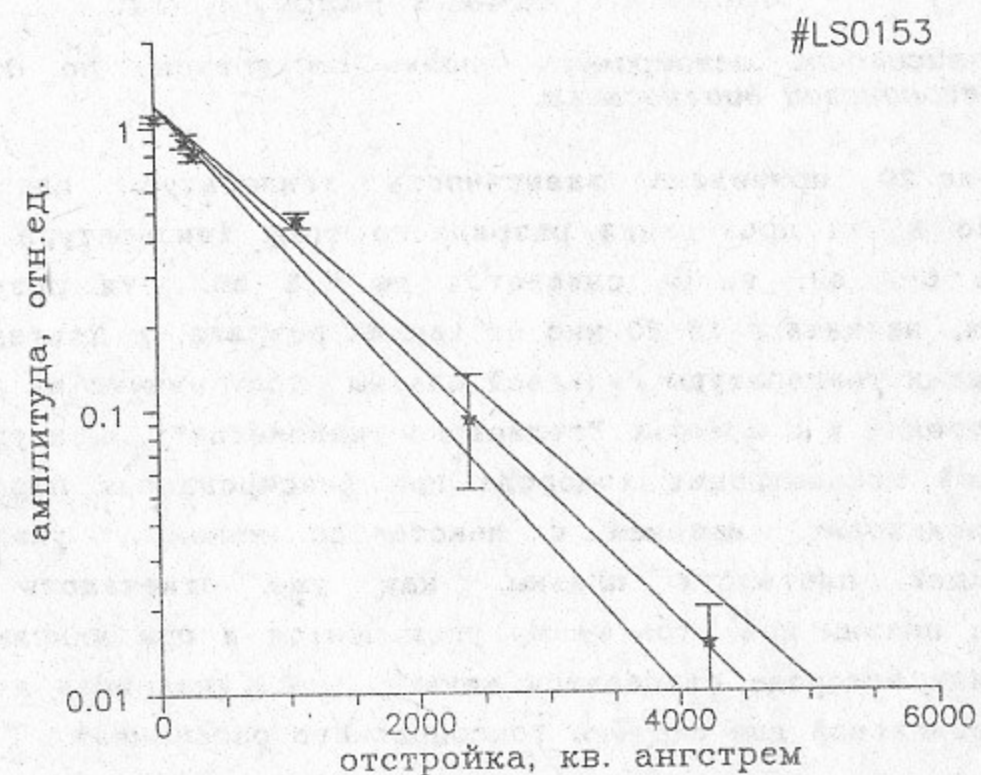


Рис. 19. Спектр томсоновского рассеяния. Проведены расчётные кривые для температур 2.5, 2.7 и 3 эВ.

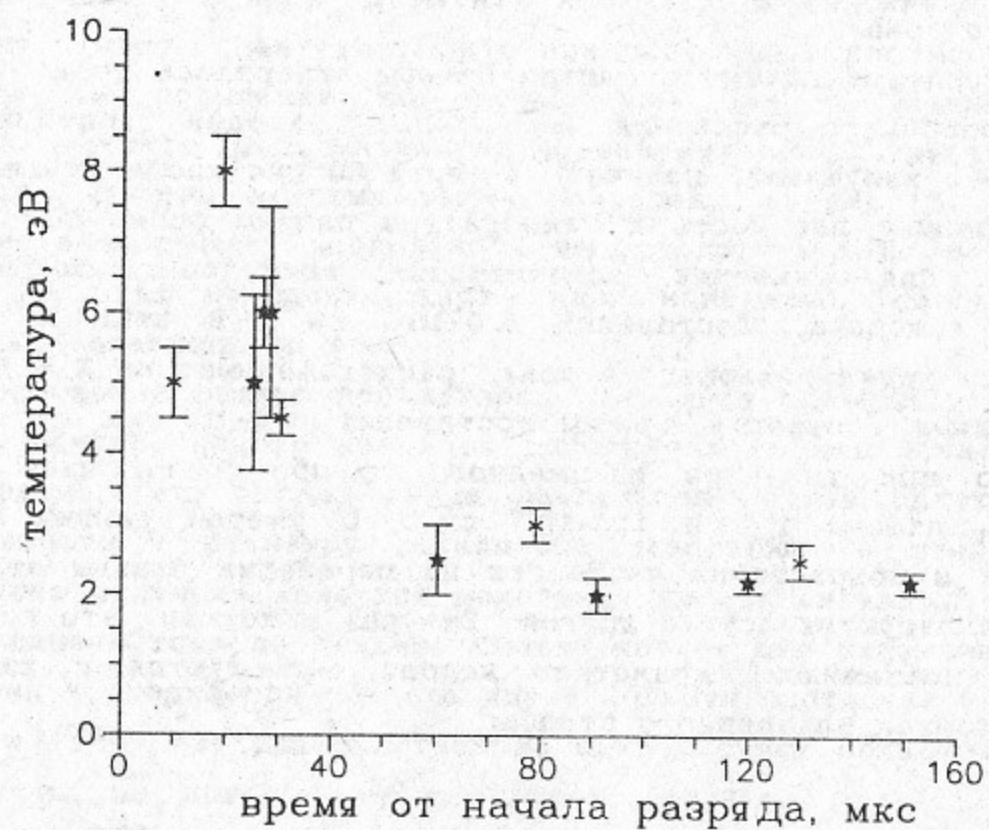


Рис. 20. Зависимость температуры плазмы от времени по данным томсоновской диагностики.

На рис. 20 приведена зависимость температуры плазмы от времени. Во время протекания разрядного тока температура плазмы доходит до 6-8 эВ, затем снижается до 2-3 эВ. Эти результаты согласуются, начиная с 15-20 мкс от начала разряда, с приведёнными в [4] оценками температуры гелиевой плазмы (полученными из диамагнитных измерений и с помощью "гелиевого термометра"). При увеличении исходной концентрации водорода при фиксированных параметрах разряда происходит, начиная с некоторого момента, уменьшение результирующей плотности плазмы, как уже отмечалось выше. Температура плазмы при этом также уменьшается и при максимальных концентрациях водорода становится меньше 1 эВ (указанная величина близка к предельной для системы томсоновского рассеяния).

### 8. Заключение

Проведена отработка схемы создания предварительной плазмы установки ГОЛ-3 при помощи сильноточного замагниченного прямого разряда в водороде. Определены основные параметры разряда, предложен механизм, объясняющий его поведение в конкретной экспериментальной геометрии. Измерены параметры предварительной плазмы.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Аржанников А.В., Бурмасов В.С., Вячеславов Л.Н., Койдан В.С. Получение плотного плазменного столба в сильном магнитном поле и диагностика его лазерными методами // Физика плазмы, 1984, т. 10, вып. 1, с. 175-182.
2. Arzhannikov A.V., Burdakov A.V., Kapitonov V.A., Koidan V.S., Konyukhov V.V., Lebedev S.V., Mekler K.I., Nikolaev V.S., Postupaev V.V., Ryutov D.D., Shcheglov M.A., Sinitskij S.L., Voropaev S.G., Vyacheslavov L.N. New experimental results on beam-plasma interaction in solenoids // Plasma Physics and Contr. Fusion (Proc. 15 Europ. Conf., Dubrovnik, 1988) - Vol.30, N 11, p.1571-1588.
3. Burdakov A.V., Deulin Yu.I., Kapitonov V.A., Koidan V.S., Kondratuev A.A., Konyukhov V.V., Lebedev S.V., Makarov A.G., Mekler K.I., Nikolaev V.S., Perin S. S., Postupaev V. V., Semenov E.P., Tauber M.V., Voropaev S.G. Production of 7 m-long plasma column in a metallic chamber in a strong magnetic field // Proc. 19 Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases. - Belgrade, 1989.- Vol.1, p.252-253.
4. Князев Б.А., Мельников П.И., Чукунов В.В. Характеристики плазмы замагниченного прямого разряда в металлической камере на установке СПИН. - Новосибирск, 1990. - 16 с. - (Препринт/Институт ядерной физики СО АН СССР; ИЯФ 90-39).
5. Воробаев С.Г., Конюхов В.В., Лебедев С.В., Щеглов М.А. Генератор мощного РЭП микросекундной длительности// ВАНТ, сер. Термоядерный синтез, 1988, вып. 3, с. 26-28.
6. Деулин Ю.И., Лебедев С.В., Николаев В.С., Семёнов Е.П. Магнитная система плазменной установки ГОЛ-3. - Новосибирск, 1990. - 9 с. - (Препринт/Институт ядерной физики СО АН СССР; ИЯФ 90-141).
7. Зоткин Р.П., Капитонов В.А., Койдан В.С., Конюхов В.В., Макаров А.Г., Меклер К.И., Николаев В.С., Перин С.С., Фирулёв К.Н. 10-МДж конденсаторная батарея для питания соленоида установки ГОЛ-3 // ВАНТ, сер. Термоядерный синтез, 1990, вып.1, с.50-54.
8. Бурдаков А.В., Драничников А.Н., Койдан В.С., Николаев В.С., Поступаев В. В., Таубер М. В. Вакуумно-плазменная система установки ГОЛ-3. - Новосибирск, 1991. - 20 с. - (Препринт /Ин-т ядерной физики СО АН СССР; ИЯФ 91-105).
9. Бурдаков А.В., Овчар В.К., Поступаев В.В. Аналоговые оптические линии связи для диагностики плазмы на установке ГОЛ-3 // Сб. "V Всес. Совещ. по диагностике высокотемпературной плазмы. Тезисы докладов". - Минск, 1990. - с. 320-321.
10. Бурдаков А.В., Поступаев В.В., Семёнов Е.П. Система измерения температуры плазмы по  $90^\circ$  томсоновскому рассеянию на установке ГОЛ-3. - Новосибирск, 1991. - 21 с. - (Препринт /Ин-т ядерной физики СО АН СССР; ИЯФ 91-33).
11. Кондратьев А.А. Экспериментальное изучение плазмы на установке ГОЛ-3: Дипломная работа. - Новосибирск, 1991.

12. Бурдаков А.В., Пиффл В., Поступаев В.В., Рауш Я. Измерение излучения плазмы, нагреваемой микросекундным электронным пучком. - Новосибирск, 1992. - (Препринт/Ин-т ядерной физики им. Г.И. Будкера; ИЯФ 92-24)
13. Ланский У.М., Щетников А.И. Винтовая неустойчивость плазменного шнура с замороженными торцами. - Новосибирск, 1989. - 11 с. - (Препринт/Ин-т ядерной физики СО АН СССР; ИЯФ 89-85).
14. Arzhannikov A. V., Burdakov A. V., Chikunov V. V., Kapitonov V.A., Knyazev B.A., Koidan V.S., Konyukhov V.V., Lebedev S.V., Mekler K.I., Melnikov P.I., Nikolaev V.S., Postupaev V.V., Ryutov D.D., Semenov E.P., Shcheglov M.A., Sinitskij S.L., Voropaev S.G., Yushkov M.V. GOL-3 programme // Proc. 8 Intern. Conf. on High-Power Particle Beams. - Novosibirsk, 1990. - Vol.1, p.14-25.
15. Бурдаков А.В., Воробаев С.Г., Губер А.Ф., Карюкин А.В., Койдан В.С., Лебедев С.В., Меклер К.И., Никуфоров А.А., Пиффл В., Поступаев В.В., Чукунов В.В., Щеглов М.А. Нагрев основной компоненты плазмы с помощью микросекундного РЭП на установке ГОЛ-3 - Новосибирск, 1992. - 25 с. - (Препринт/Институт ядерной физики СО РАН; ИЯФ 92-8).

А.В.Бурдаков, С.Г.Воропаев, В.С.Койдан,  
С.В.Лебедев, К.И.Меклер, В.В.Поступаев

Характеристики плазмы, создаваемой глинным  
замагниченным прямым разрядом в металлической  
камере

ИЯФ 93-30

Работа поступила 30 марта 1993 г.

---

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

Подписано к печати 31 марта 1993 г.

Формат бумаги 60x90 1/16. Объем 2,0 печ.л., 1,6 учетно-изд.л.

Тираж 250 экз. Бесплатно. Заказ № 30

---

Ротапринт ИЯФ СО РАН, г.Новосибирск 90