

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера СО РАН

Р.Ю. Акентьев, А.В. Аржанников, В.Т. Астрелин,
А.В. Бурдаков, И.А. Иванов, В.С. Койдан,
К.И. Меклер, С.В. Полосаткин, В.В. Поступаев,
А.Ф. Ровенских, С.Л. Сеницкий

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ДИНАМИКИ ИСПАРЕНИЯ
И РАЗЛЕТА ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ
КРУПИНКИ В ПЛАЗМЕ,
НАГРЕТОЙ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

ИЯФ-2003-6

НОВОСИБИРСК
2003

**Экспериментальное исследование
динамики испарения и разлета твердотельной крупинки в плазме,
нагретой электронным пучком**

*Р.Ю. Акентьев, А.В. Аржанников, В.Т. Астрелин,
А.В. Бурдаков, И.А. Иванов, В.С. Койдан,
К.И. Меклер, С.В. Полосаткин, В.В. Поступаев,
А.Ф. Ровенских, С.Л. Синецкий*
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, СО РАН
630090, Новосибирск, РФ

Аннотация

Представлены результаты экспериментов по инъекции твердотельных крупинок в нагретую электронным пучком плазму на установке ГОЛ-3. Обсуждаются параметры плотного плазменного сгустка, образующегося в результате взрывного испарения крупинки.

**Experimental study of dynamics of evaporation
and expansion of a solid pellet
in electron-beam-heated plasma**

*R.Y. Akentjev, A.V. Arzhannikov, V.T. Astrelin,
A.V. Burdakov, I.A. Ivanov, V.S. Koidan,
K.I. Mekler, S.V. Polosatkin, V.V. Postupaev,
A.F. Rovenskikh, S.L. Sinitsky*

Abstract

Results of experiments on injection of solid pellets into electron-beam-heated plasma are presented. Parameters of a dense plasmod, formed as result of pellet explosion, are discussed.

1. Введение

Одной из альтернативных термоядерных систем с магнитным удержанием является многопробочная ловушка, в которой для увеличения времени жизни плазмы магнитное поле имеет конфигурацию гофрированного соленоида [1]. В схеме многопробочного удержания длина свободного пробега ионов должна быть существенно меньше полной длины системы, поэтому для достижения реакторных параметров при разумных размерах установки плазма должна иметь плотность $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (см., напр., [2]) и, соответственно, величину β больше 1. Задача получения такой плазмы к настоящему времени пока не решена.

Работы на установке ГОЛ-3 проводятся в основном с целью изучения физики получения и удержания плотной горячей плазмы в многопробочной магнитной системе [3]. Схема эксперимента приведена на рис.1. Водородная или дейтериевая плазма, имеющая плотность от 10^{14} до 10^{16} см^{-3} , создается при помощи специального прямого разряда в продольном магнитном поле. Приведем параметры, типичные для обсуждаемых экспериментов с инжекцией крупинок. Длина плазменного столба ~ 12 м, диаметр - 6 см. Магнитное поле создается соленоидом, магнитная индукция в однородной части равна 4.8 Тл, поле в концевых пробках - 9 Тл. Вблизи концов соленоида было сформировано по 10 ячеек длиной 22 см каждая с полем в минимуме 3.3 Тл. Таким образом были созданы два участка с гофрированным магнитным полем. Для нагрева плазмы в нее инжектируется релятивистский электронный пучок (энергия ~ 1 МэВ, ток ~ 30 кА, длительность ~ 7 мкс, энергосодержание за импульс 120 – 150 кДж).

Кратко рассмотрим физику пучкового нагрева плазмы применительно к условиям данного эксперимента (по работам [3 – 6]). В результате коллективного взаимодействия пучка с плазмой в ней возбуждаются резонансные с пучком ленгмюровские колебания, которым пучок передает часть своей энергии. Затем в результате нелинейной релаксации этих колебаний происходит нагрев электронов плазмы. Экспериментально показано, что пучок может терять до 30 – 40% своей энергии при прохождении через плазменный столб длиной 12 м. При этом во время инжекции пучка электронная температура плазмы растет и при плотности 10^{15} см^{-3} может достигать 2 кэВ. Ионная температура остается невысокой из-за короткого времени существования горячей плазмы.

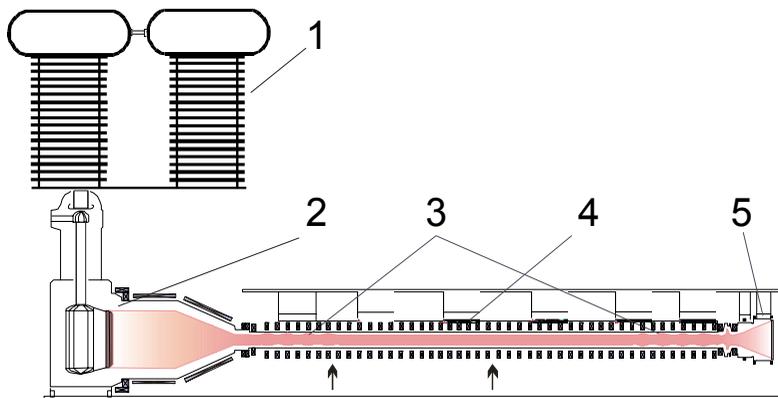


Рис. 1. Схема установки ГОЛ-3. Цифрами обозначены: 1 – генератор электронного пучка У-2, 2 – система генерации электронного пучка (ленточный диод и область магнитной компрессии пучка), 3 – участки гофрированного поля, 4 – соленоид, 5 – выходной узел (система генерации предварительной плазмы и приемник пучка). Стрелками показаны места расположения двух инжекторов крупинки.

При увеличении плотности плазмы эффективность релаксации пучка уменьшается, достигаемая электронная температура становится меньше. В то же время для реализации режима многопробочного удержания нужна высокотемпературная плазма с плотностью $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Такая плотность является слишком высокой для эффективной релаксации пучка за счет коллективных эффектов. Для достижения высокой температуры плотной плазмы на установке ГОЛ-3 впервые был реализован т.н. метод двухступенчатого нагрева плотной плазмы [7]. Суть метода в том, что в длинном столбе основной плазмы с плотностью $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ создается короткий плазменный сгусток с плотностью $10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Основная плазма нагревается за счет релаксации электронного пучка, затем происходит выравнивание температур основной плазмы и сгустка за счет парных столкновений.

Эксперименты по этой схеме проводились с использованием импульсного напуска газа для формирования требуемого профиля плотности по длине установки. Получено увеличение давления плазмы до 3-х раз по сравнению с давлением однородной плазмы с оптимальной для релаксации пучка плотностью. Ионная температура в плотных сгустках близка к электронной (измерена ионная температура до 150 эВ при плотности выше $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ [5]). Дальнейшее увеличение температуры сгустка плотной плазмы ограничивается продольной теплопроводностью и быстрым продольным расширением плотного сгустка.

Проведенные эксперименты показали работоспособность схемы двух-

ступенчатого нагрева плотной плазмы. В то же время методика получения плотного сгустка за счет импульсного напуска газа имеет ряд ограничений:

- а) плотным газом заполняется все сечение камеры, а не только область, занятая плазменным шнуром. При этом большая плотность нейтрального газа на периферии шнура приводит к росту перезарядных потерь, потерь на ионизацию, и способствует охлаждению периферии плазмы;
- б) наличие плотной и холодной периферии плазмы затрудняет или делает невозможным использование ряда традиционных методов диагностики (анализ нейтралов перезарядки, анализ интенсивности и профиля спектральных линий);
- в) рост плотности облака нейтрального газа способствует возникновению условий для развития винтовой неустойчивости. Это связано с тем, что при увеличении плотности выше некоторой степени начальная ионизация плазмы становится незначительной. Это приводит к ухудшению компенсации тока электронного пучка при его транспортировке через плазму. Большой нескомпенсированный ток пучка является причиной потери макроскопической устойчивости пучка при превышении предела Шафранова-Крускала;
- г) ограничен элементный состав вводимых в плазму газов.

В представленной работе описываются эксперименты по созданию плотных плазменных сгустков методом инъекции твердотельных крупинок. Крупинка вещества с числом атомов масштаба 10^{20} вводится в определенную точку по сечению плазменного столба. Под действием потока быстрых электронов происходит быстрое разрушение крупинки, ее последующее испарение и ионизация атомов. При этом плотный слабоионизированный пар может распространяться на расстояние ~ 1 см и поперек магнитного поля. После полной ионизации вещества образовавшаяся плотная плазма становится замагниченной, дальнейший ее нагрев происходит так же, как в описанной выше двухступенчатой схеме. Такой сценарий получения плотного плазменного сгустка не имеет перечисленных выше недостатков схемы импульсного газонапуска. Помимо задачи получения плотного сгустка с высоким давлением плазмы, предложенную технологию можно использовать и для решения следующих физических задач: локальная диагностика параметров плазмы (совместно с оптическими методиками), получение яркого источника линейчатого излучения многозарядных ионов заданного элементного состава, изучение абляции вещества в высокотемпературной плазме.

Методика инъекции крупинки вещества в плазму известна и используется на ряде установок для подпитки плазмы веществом, управления профилем плотности и для целей диагностики (см., напр., [8 – 10]). Диапазон физических параметров, характерных для ГОЛ-3, позволяет использовать нетрадиционный подход к методике инъекции крупинки в плазму и значи-

тельно упростить и удешевить необходимое оборудование. Время существования плазмы мало, поэтому крупинку можно инжектировать в нужную точку к началу разряда, исключая ее транспортировку сквозь горячую плазму (снижается необходимая начальная скорость инъекции, исключается испарение наружных слоев крупинки на периферии). Радиационными потерями плазмы на этом этапе экспериментов можно пренебречь даже при высокой концентрации примесей, поэтому в обсуждаемой системе инжектируются крупинки из твердых водородосодержащих веществ (полимеры, гидрид лития и т.п.). Крупинки для диагностических целей могут быть с практически любым химическим составом.

2. Постановка эксперимента и диагностики

Для создания инжектора крупинок была выбрана электродинамическая схема. Параметры системы определялись следующими техническими требованиями: независимость работы системы от материала и веса (в пределах 0.1 – 10 мг) крупинки, возможность проведения до 5 импульсов без нарушения вакуума в установке, точная синхронизация с остальными системами установки. Электродинамическая система инжектора состоит из плоской катушки и расположенного вплотную к катушке диска-толкателя. При протекании импульса тока по катушке в диске-толкателе наводятся токи отражения, он ускоряется и ударяет по бойку, в центральном углублении которого помещается крупинка. Была выбрана схема с жестким торможением бойка для того, чтобы гарантировать отрыв крупинки от его поверхности. Инжекция осуществляется снизу вверх.

Импульс тока в катушке инжектора создается простым источником, состоящим из конденсатора типа МБГВ (160 мкФ, 500 В) и тиристорного ключа. Параметры электрической цепи были выбраны так, чтобы длительность импульса тока была по порядку величины равна времени проникновения магнитного поля в материал диска-толкателя. Амплитуда тока при напряжении зарядки конденсатора 350 В составляет ~1.5 кА при длительности импульса тока по основанию ~75 мкс. Точное позиционирование крупинки в камере к моменту инъекции пучка обеспечивается подбором рабочего напряжения при фиксированном времени запуска тиристорного ключа (13530 мкс до начала пучка, что несколько раньше включения магнитной системы). Начальная скорость крупинки изменяется в диапазоне 10 – 25 м/с при изменении напряжения питания от 200 до 350 В. Разброс положения крупинки от импульса к импульсу составляет ~2 см относительно центра плазменной камеры.

Было изготовлено и смонтировано на установке два инжектора. Первый инжектор располагался в окне диагностического промежутка между 59 и 60 катушками приблизительно в центре соленоида установки ГОЛ-3 (расстояние Z от центра входной пробки, принятого за начало координат, равно

662 см). Второй инжектор крупинок был установлен на $Z = 219$ см (между 19 и 20 катушками).

Для диагностики параметров плотной плазмы использовалось несколько методик. В месте расположения первого (центрального) инжектора изображение плотного сгустка регистрировалось при помощи цифровой фотокамеры и цифровой ВУФ обскуры (длительность кадра ~ 1 мкс, излучение попадает непосредственно на поверхность МКП). Спектр же свечения сгустка в видимом диапазоне регистрировался цифровым спектрографом с пространственным разрешением. Измерение электронной плотности в плотном сгустке проводилось по уширению водородной линии H_{α} при помощи комбинированной цифровой спектральной системы, состоящей из двух частей: спектрометра высокого разрешения (детектор на основе фотодиодной линейки) с длительностью кадра ~ 1 мкс и системы с умеренным спектральным разрешением, сканирующей профиль линии с шагом 5 – 20 мкс. Свет передавался к этой диагностике по оптоволокну, приемный конец которого мог перемещаться вдоль камеры и устанавливался на разных расстояниях от инжектора крупинок. Плотность плазмы на расстоянии ~ 1.9 м от инжектора измерялась интерферометром Майкельсона на длине волны 1.15 мкм, второй такой интерферометр находился на $Z = 84$ см. Профиль температуры по сечению плотного сгустка оценивался по соотношению интенсивностей спектральных линий ионов, входящих в различном зарядовом состоянии. Для этого использовался ВУФ спектрограф с пространственным разрешением и длительностью кадра ~ 1 мкс. ВУФ излучение плазмы мониторировалось также несколькими вакуумными фотодиодами, расположенными на разных расстояниях от инжектора крупинок. Применялись также остальные «стандартные» диагностические средства установки.

Второе место инъекции крупинок ($Z = 219$ см) отличается другим набором измерительного оборудования, расширяющего информацию о параметрах плотного сгустка. Непосредственно в точке инъекции велись наблюдения оптическим спектрометром с пространственным разрешением и 16-канальной ВУФ обсурой (приемниками излучения служат алюминиевые фотокатоды). Система томсоновского рассеяния (694 нм, 5 Дж) располагалась в 33 см от точки инъекции и позволяла измерять электронную температуру и плотность непосредственно внутри плотного сгустка. Между инжектором и системой томсоновского рассеяния было 3 датчика диамагнетизма плазмы. По другую сторону, на расстоянии 22 см от точки инъекции крупинок, располагались датчики мягкого рентгеновского излучения плазмы (фильтры 8 и 100 мкм бериллия с энергией отсечки 0.8 и 2.2 кэВ).

3. Общая картина образования и разлета плотного плазмоида

Предварительная (мишенная) плазма на установке ГОЛ-3 создается при помощи специального прямого разряда. Напуск водорода в камеру про-

изводится при помощи системы импульсных клапанов так, чтобы к моменту начала предварительного разряда газ заполнял часть вакуумной системы установки от области компрессии электронного пучка до места, где расположен кольцевой катод прямого разряда (см. [6]). Область генерации электронного пучка и выходного приемника пучка остаются в этом случае при рабочем вакууме. Вследствие такого способа создания предварительной плазмы имеется неоднородность плотности по длине, связанная с нестационарностью распространения газа вдоль камеры. В экспериментах с крупинками начальная плотность основной плазмы в центральной части камеры (вблизи точки установки первого инжектора крупинки) была $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Ближе к концам солеоида начальная плотность снижалась в 2-3 раза.

В целом картина образования плотного плазменного сгустка и его разлета соответствовала ожидаемой (описанной во Введении). Динамика разлета крупинки видна из приведенных на рис.2 фотографий, полученных при помощи ВУФ обскуры с экспозицией 1 мкс. В этих экспериментах использовалась 0.15 мг крупинка из полиэтилена. До начала инъекции пучка (при движении крупинки по нейтральному газу или по низкотемпературной предварительной плазме прямого разряда) никаких признаков начала испарения крупинки не зарегистрировано.

Испарение крупинки начинается вскоре после начала инъекции электронного пучка при еще относительно небольшой температуре окружающей плазмы. Как было показано ранее (см. [11]), при обсуждаемых условиях происходит взрывное разрушение твердого тела за счет объемного энерговыделения быстрых электронов. На этой стадии разлет плотной плазмы является сферическим (см. рис. 2а). Для экспериментов на установке ГОЛ-3 характерным является широкий энергетический спектр электронов, что является результатом коллективной релаксации пучка в плазме (см. [5]). При этом в обсуждаемых режимах измеренный спектр быстрых электронов является с экспериментальной точностью монотонно спадающим в сторону высоких энергий. Зарегистрированы электроны с энергиями до 1.3 – 1.5 МэВ, т.е. значительно превышающими энергию инжектируемых электронов пучка. Энерговклад в материал крупинки на первой стадии по оценке дают главным образом быстрые электроны, энергия которых от мегавольт до кэВ (пробег таких электронов много больше эффективной толщины плотного сгустка) до ~ 10 кэВ. Мощность, передаваемая в плазму крупинки, растет с ростом поперечного сечения плотного сгустка из-за увеличивающегося вклада электронов с относительно низкими энергиями (т.е. таких, пробег которых в плотной плазме сравним с ее эффективной толщиной, уменьшающейся с ростом диаметра сгустка).

В течение некоторого времени центр сгустка остается холодным. В экспериментах с относительно массивной крупинкой (1 мг полиэтилена) по отношению интенсивностей линий ионов $\text{CIII } 57.4 \text{ нм}$ и $\text{CIV } 154.8 \text{ нм}$ вычислена температура $\sim 2.5 \text{ эВ}$ в центре сгустка (интервал 4 – 6 мкс от начала

инъекции пучка). Оценка плотности плазмы дает в этот момент величину $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ для ионов и примерно вдвое больше для электронов. Для условий обсуждаемых экспериментов замагниченность наступает приблизительно при $nT^{3/2} \sim 10^{16} \text{ см}^{-3} \cdot \text{эВ}^{-3/2}$, т.е. плотная плазма все еще незамагничена в это время.

По мере расширения сгустка его плотность падает, а мощность нагрева в расчете на одну частицу и температура растут. Поэтому переход к полной замагниченности наступает достаточно быстро. После того, как поперечный диаметр сгустка достигает $\sim 1.5 \text{ см}$, поперечное расширение прекращается (см. рис.2б).

Далее начинается одномерное расширение плотной плазмы вдоль магнитного поля (рис.2с). Важным моментом, влияющим на характер расширения плотного сгустка на этом этапе, является процесс переноса тепла вдоль магнитного поля. Напомним, что в условиях нелинейной релаксации пучка и сильно турбулентной плазмы на стадии нагрева существует аномально низкая теплопроводность, при которой коэффициенты продольного переноса подавлены на 2-3 порядка по сравнению с классическими [12]. К концу импульса пучка, когда электроны плазмы достигают киловольтных температур, а мощность нагрева начинает снижаться, аномалия в теплопроводности исчезает и происходит быстрое восстановление коэффициентов переноса до значений, близких к классическим. При этом за время масштаба одной-нескольких микросекунд тепловая энергия, запасенная в 12-метровом столбе в пределах силовой трубки магнитного поля, занятой веществом крупинки, передается в плотный сгусток и быстро термализуется. При этом на короткое время в месте инъекции крупинки в плазме образуется локальный пик давления.

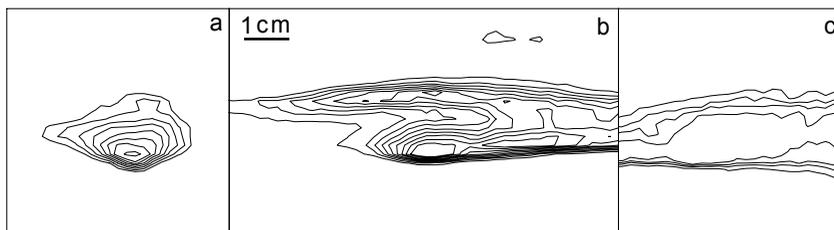


Рис. 2. Свечение плотной плазмы в ВУФ диапазоне на разных стадиях образования сгустка, экспозиция 1 мкс (показаны линии постоянной яркости с уровнем, превышающим яркость свечения окружающей плазмы). Пространственный масштаб для всех кадров одинаков. Параметры: а) 2 мкс от начала пучка формирование сферического сгустка и трехмерное расширение; б) 4 мкс от начала пучка, переход к замагниченности; с) 6 мкс от начала пучка, одномерное расширение.

Оценку динамики плотного сгустка на стадии одномерного расширения можно получить, используя простую гидродинамическую модель, предложенную в [13]. В этой модели рассматривается расширение в пустоту плоского сгустка плазмы в приближении локального термодинамического равновесия. Для некоторых практически интересных профилей энерговыделения по толщине плазмы (однородного или параболического) эта модель дает аналитические решения для размера и скорости расширения плотного сгустка. При этом асимптотическая скорость расширения сгустка v_{max} оказывается связанной с удельным энерговыделением простым соотношением:

$$v_{max} = \sqrt{6Q_0/\mu},$$

где Q_0 – полная энергия, сообщенная единице поперечной площади сгустка внешними источниками нагрева, μ – масса на единицу площади сгустка. Таким образом, используя описанную выше простую модель, по измеренной динамике плотности в сгустке можно определить величину энергии, передаваемой от основной плазмы к материалу крупинки (далее такие измерения будут обсуждаться подробно).

Рассмотрим кратко вопрос устойчивости плазменного столба с расположенным в центральной области длинным шнуром более плотной плазмы. В результате экспериментов получено, что наличие крупинки в плазме не оказывает видимого влияния на работу прямого разряда, создающего предварительную (мишенную) плазму на установке. Инжекция и транспортировка релятивистского пучка по плазме при этом также не имеет существенных особенностей, в отличие от применявшегося ранее метода импульсного газонапуска. Заметим, что в специальных экспериментах со вторым инжектором были созданы условия для возникновения срывов, связанных с появлением области низкотемпературной плотной плазмы, занимающей все сечение плазменного столба (такая ситуация является типичной для экспериментов с формированием плотной плазмы методом импульсного газонапуска). Пример такого срабатывания установки приведен на рис.3. В вакуумную камеру инжестировалось ~ 1 мг мелкодисперсного порошка дейтерида лития. После испарения этого вещества в установке образуется участок плотной плазмы, занимающий практически все сечение плазменного шнура. При этом давление плазмы (по данным расположенного поблизости диамагнитного датчика) стремится к нулю сразу после окончания импульса пучка. Одновременно примерно в 3 раза увеличиваются показания стеночного калориметра, расположенного в 66 см от инжектора. В спектре свечения плазмы в этом режиме появляются линии NaI (дублет 589.0 и 598.6 нм) и SiII (595.8 и 597.9 нм), что указывает на испарение поверхности ситалловой конструктивной защиты диамагнитных датчиков.

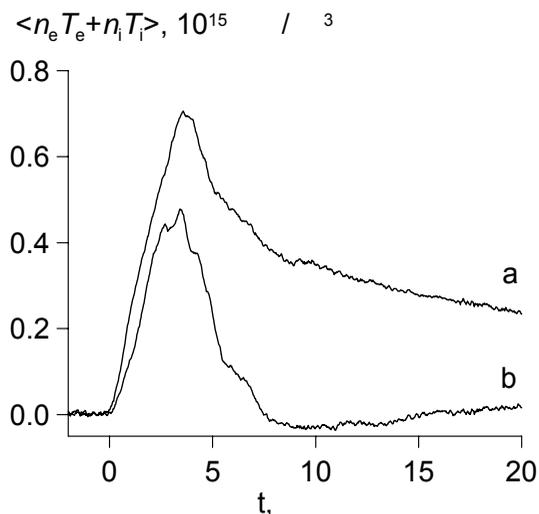


Рис. 3. Моделирование условий срыва при инъекции порошка LiD в камеру. Приведены сигналы диамагнитного датчика, расположенного на $Z = 209$ см (в 10 см от инжектора крупинок). Буквами обозначены: а – крупинка 0.3 мг LiD, б – инжектируется ~ 1 мг мелкодисперсного порошка LiD.

4. Параметры сгустка плотной плазмы

Первая серия экспериментов была проведена с инжектором, расположенным на $Z = 662$ см. В качестве крупинок использовался в основном полиэтилен с массой от 0.1 до 1 мг. Динамика плотности плазмы в точке инъекции определялась с разрешением во времени по данным штарковской спектроскопии профиля линии H_{α} . Окружающая основная плазма была на несколько порядков менее яркой и на профиль линии не влияла. Измеряемая полная ширина профиля по основанию превышала 10 нм (около 500 измеренных точек с шагом 0.03 нм – см. рис.4). На этом профиле хорошо прослеживается структура, соответствующая первым нескольким четным гармоникам циклотронной частоты и, возможно, есть некоторый вклад от линий СП 657.8 и 658.3 нм.

В ходе одномерного разлета замагниченной плазмы плотность падает с 10^{18} до 10^{16} см^{-3} за ~ 30 мкс (см. рис.5). Ход падения плотности в этот отрезок

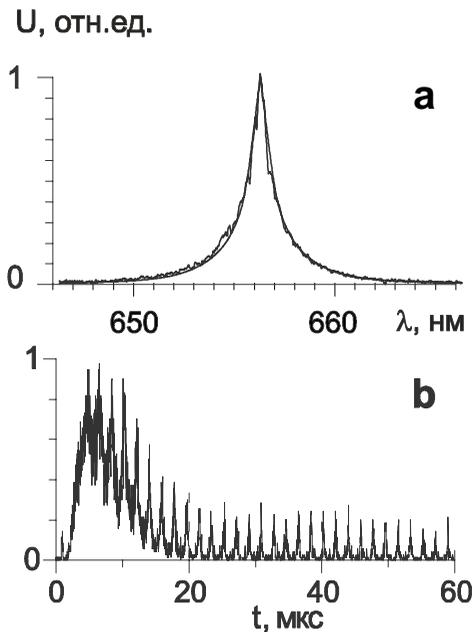


Рис 4. Типичные результаты измерения профиля линии H_{α} в экспериментах с крупинкой. Верх (a) – кадр системы высокого спектрального разрешения (показан также расчетный профиль линии для $1.7 \cdot 10^{17}$ см^{-3} , 4 эВ). Низ (b) – сигнал системы сканирования профиля линии (измерения через 10 нс, регистрируется свечение на расстоянии ~ 50 см от инжектора).

зок времени определяется скоростью продольного расширения сгустка. Измеренная зависимость хорошо согласуется с предсказанием упомянутой выше простой одномерной газодинамической модели расширения плотного сгустка в предположении типичных для экспериментов ГОЛ-3 профиля энерговыделения по глубине сгустка и линейного роста мощности нагрева во время инъекции. Сравнение с экспериментом показывает, что для получения наблюдаемой динамики плотности плазмы скорость расширения сгустка (т.е. удвоенная скорость фронта) должна быть приблизительно $6.2 \cdot 10^7$ см/с. Это соответствует направленной кинетической энергии ионов водорода на фронте сгустка ~ 0.5 кэВ, что значительно больше, чем температура плотной плазмы в начальной точке инъекции крупинки. Подгонка модельного расчета к экспериментальным данным осуществлялась фактически при помощи одного свободного параметра – энерговклада в плотную плазму, который оказал

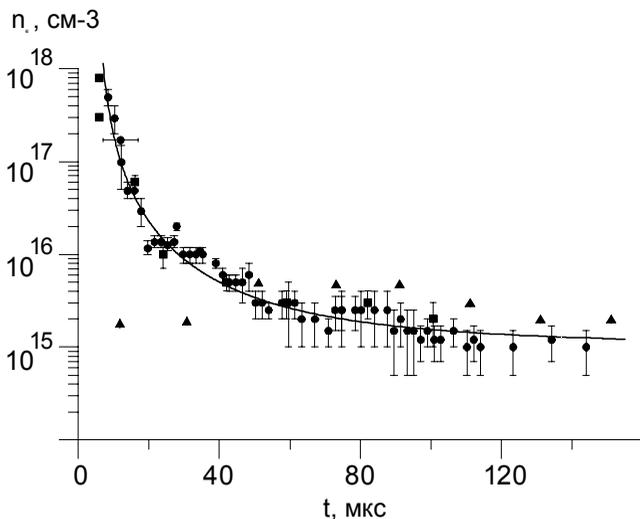


Рис. 5. Динамика плотности плотной плазмы по данным спектроскопических измерений. Кружки – инжектор на $Z = 662$ см, наблюдение в точке инжекции. Квадраты и треугольники – инжектор на $Z = 219$ см, наблюдение в точке инжекции и на расстоянии 1.4 м по ходу пучка (точность измерений в этом случае выше из-за меньшего перепада уровня сигнала).

ся равным ~ 1 кДж/см². Другими параметрами модели являются: известная масса крупинки в пересчете на единицу площади плотного сгустка и средний заряд ионов в сгустке (определяющий отношение электронной и ионной плотностей), который можно для плотной плазмы с достаточной точностью оценить по измеренной температуре.

Вторая точка инжекции крупинок на $Z = 219$ см представляла интерес по нескольким причинам. Основное отличие по физике образования плотного плазменного сгустка здесь в том, что эта точка находится примерно на границе области максимального нагрева (вдвое более высокая по сравнению с местом установки первого детектора электронная температура при заметном ее градиенте по длине, тогда как первый инжектор расположен в области со слабым градиентом температуры). Кроме того, от входной пробки до этой точки расположена секция гофрированного магнитного поля, имевшая на момент проведения экспериментов длину 2.2 м. В классической схеме многопробочного удержания ионы плазмы при определенных условиях испытывают действие своего рода силы трения со стороны гофрированного поля, приводящее к уменьшению скорости продольного расширения. Эта теория подразумевает достаточно длинную систему, при которой функция распределения близка к изотропной, и заметно отличается от случая движе-

ния потока плазмы с большой направленной скоростью. Однако и в нашем случае можно было ожидать некоторого эффекта, связанного с гофрировкой поля.

Эксперименты в этой точке проводились с крупинками из полиэтилена массой 0.15 – 0.4 мг и дейтерида лития 0.02 – 0.5 мг. Отдельные эксперименты были поставлены с одновременной инъекцией нескольких крупинок, в том числе и из разных материалов. В целом характер испарения крупинки и начального расширения плотной плазмы совпадает с описанным выше. Динамика плотности плазмы в точке инъекции практически совпадает с данными, полученными для первого инжектора – см. рис.5. На этом же рисунке приведены данные, полученные при размещении приемного световода на $Z = 350$ см (крупинка 0.1 мг LiD). Видно, что эти измерения показывают рост локальной плотности более чем вдвое на интервале 40 – 120 мкс. Это свидетельствует, скорее всего, о торможении разлетающегося сгустка в основной плазме (что не учитывается моделью).

При модельных расчетах использовались также данные о поперечном размере плотной плазмы в точке инъекции, измеренные при помощи ВУФ обскуры. На рис.6 приведены типичные осциллограммы сигналов нескольких каналов обскуры и карта яркости участка с крупинкой, построенная по центральному 9 каналам. Видно, что свечение в ВУФ диапазоне начинается сразу после инъекции пучка, однако уровень сигналов остается небольшим в течение нескольких микросекунд. Яркая вспышка в ВУФ диапазоне начинается ближе к концу импульса электронного пучка. Предположительно такое поведение сигналов связано с исчезновением аномалии в продольной электронной теплопроводности и «залповым» введением в плотный сгусток относительно большой энергии.

Помимо динамики плотности сгустка модельные расчеты дают и изменение температуры плотной плазмы. Эта же величина получена и в эксперименте (по точному измерению динамики профиля линии H_{α}). На рис.7 приведена динамика давления плазмы в сгустке (данные инжектора на $Z = 662$ см). Магнитное поле на оси в точке расположения этого инжектора составляет 3.8 Тл. Таким образом, на начальных стадиях разлета крупинки измеренная величина β составляет по крайней мере десятки процентов (по вакуумному полю). Модель формально позволяет экстраполировать β до величин, превышающих 1, однако для плотной слабозамagnetической плазмы такая экстраполяция представляется в достаточной мере не имеющей физического смысла.

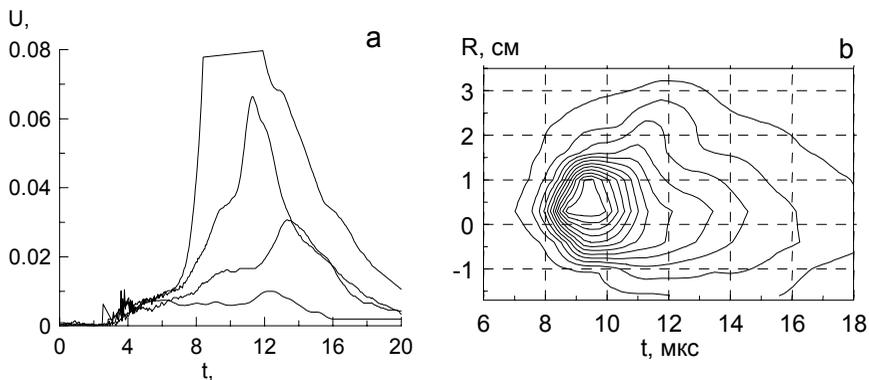


Рис. 6. Излучение плотной плазмы в ВУФ диапазоне. Начало инжекции пучка в 2.5 мкс. Часть **a** – сигналы каналов ВУФ обскуры с лучами зрения, проходящими на минимальном расстоянии от центра крупинки 0.5 см, 1.7 см, 2.1 см, 2.9 см (сверху вниз). Часть **b** – линии равной яркости, проведенные через каждые 0.02 В (координата отсчитывается от оси камеры)

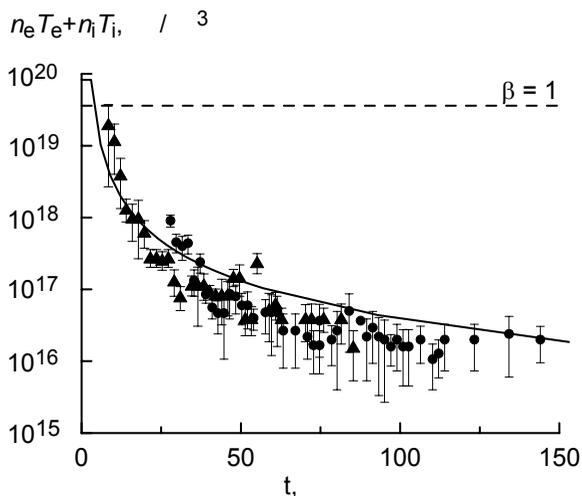


Рис. 7. Динамика давления плотной плазмы в точке инжекции. Кружки и треугольники - измеренные данные двух выстрелов с первым инжектором, сплошная линия – модель, пунктир – уровень, соответствующий давлению магнитного поля в точке инжекции (3.8 Тл).

При работе с инжектором на $Z = 219$ см впервые были произведены измерения параметров непосредственно сгустка плотной плазмы при помощи системы томсоновского рассеяния. Так как точка наблюдения находилась в 33 см от точки инжекции крупинки, то было принято решение зафиксировать момент срабатывания лазера в момент 15 мкс после начала инжекции пучка (к этому времени яркость собственного свечения сгустка снижается и становится приемлемой для регистрации сигналов рассеяния). К особенностям измерений следует отнести примерное равенство трех величин: диаметра шнура плотной плазмы (около 1.5 – 2 см), разброса положения крупинки в камере (около 2 см) и размера области светосбора системы томсоновского рассеяния (2.0 см). Поэтому фактически в каждом отдельном эксперименте лазерный луч проходил в некоторой окрестности центра плотного сгустка. Измеренные значения плотности и температуры варьируются от $0.7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, 170 эВ до $2.4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, 10 эВ (типичные спектры рассеяния приведены на рис.8). Эти результаты неплохо согласуются с приведенными выше данными спектральной и других диагностик.

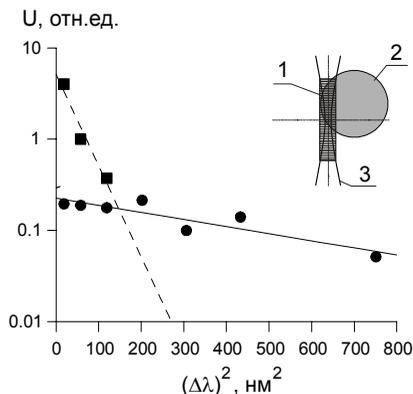


Рис. 8. Томсоновское рассеяние в экспериментах с крупинкой. На схеме цифрами обозначены: 1 – проекция входной щели спектрального прибора (уширено для наглядности рисунка), 2 – поперечное сечение сгустка плотной плазмы, 3 – огибающая лазерного луча. Кружки и квадраты – измеренный спектр рассеянного излучения для двух разных импульсов. Сплошная линия – подгонка с $n_e = (0.37 \pm 0.05) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $T_e = 150 \pm 30$ эВ; пунктир – $n_e = (2.4 \pm 1) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $T_e = 11 \pm 3$ эВ.

В экспериментах с инжекцией крупинки измерялся также диамагнетизм плазмы на разных расстояниях от точки инжекции (всего на установке работает около 25 таких датчиков). Однозначного утверждения о том, что зарегистрировано изменение диамагнетизма, связанное с наличием крупинки, пока сделать нельзя. Дело в том, что даже при очень высоких удельных

параметрах плотной плазмы (предположим, $\beta \sim 1$) ее вклад в полный сигнал датчика за счет маленькой площади плотного сгустка не превышает 5 – 20%. Существующий разброс энергетического времени жизни плазмы приводит к аналогичным отличиям во временном ходе диамагнитных сигналов, что маскирует эффекты, связанные с наличием крупинки.

5. Заключение

Проведенные на установке ГОЛ-3 эксперименты по инъекции крупинок в целом подтвердили существовавшее представление о характере образования и расширения сгустка плотной плазмы, образующегося при взрывном (объемном) испарении крупинки. При использовании крупинки с массой ~ 0.3 мг измеренная скорость расширения плотной плазмы соответствует кинетической энергии протонов на фронте ~ 500 эВ. При этом удельный энергетический вклад в крупинку достигает величины ~ 1 кДж/см². Это значение существенно превышает соответствующую величину в окружающей плазме (полное энергосодержание плазмы в максимуме нагрева составляет от 5 до 10 кДж в разных режимах при площади поперечного сечения в секции однородного поля соленоида ~ 30 см²). Разница может быть связана с поперечным переносом энергии (концентрацией в плотном сгустке) за счет как быстрых электронов, так и теплопроводности.

Предполагается дальнейшее развитие методики создания плотных сгустков, в том числе проведение инъекции крупинки в участке соленоида с гофрированным магнитным полем. Рассматривается также возможность инъекции криогенных водородных крупинок.

Благодарности

Авторы выражают благодарность С.С.Гарифову, В.Г.Иваненко, А.В.Кутовенко, Е.В.Мостипанову, В.А.Расторопову за помощь в подготовке и проведении экспериментов.

Работа проведена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта РФФИ-99-02-16728.

7. Литература

1. Будкер Г. И., Мирнов В. В., Рютков Д. Д. Влияние гофрировки магнитного поля на расширение и остывание плотной плазмы // Письма в ЖЭТФ, 1971, т.14, с.320.
2. Lichtenberg A. J., Mirnov V. V. Multiple Mirror Plasma Confinement, in: Reviews of Plasma Physics, **19**, ed. В.В.Кадомтсев, New York: Consultant Bureau/Plenum Press, 1996.
3. Agafonov M. A., Arzhannikov A. V., Astrelin V. T., Bobylev V. B., Burdakov A. V., Chagin M. N., Denisenko P. V., Deulin Yu. I., Khilchenko A. D., Koidan V.

- S., Konyukhov V. V., Kvashnin A. N., Lee O. A., Makarov A. G., Mekler K. I., Melnikov P. I., Nikolaev V. S., Perin S. S., Postupaev V. V., Razilov R. V., Rovenskikh A. F., Semenov E. P., Sinitzky S. L., Tarasov A. V., Vdovin S. V., Zotkin R. P.* Plasma Heating by High-Energy-Content Microsecond Electron Beam at the GOL-3-II Facility // *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 1996, v.38, p.A93.
4. *Бурдаков А. В., Воронаев С. Г., Койдан В. С., Лебедев С. В., Меклер К. И., Никуфоров А. А., Пиффл В., Поступаев В. В., Щеглов М. А.* Эксперименты по коллективному взаимодействию микросекундного релятивистского электронного пучка с плазмой на установке ГОЛ-3 // *ЖЭТФ*, 1996, т.109, с.2078.
 5. *Arzhannikov A. V., Astrelin V. T., Burdakov A. V., Ivanenko V. G., Koidan V. S., Konyukhov V. V., Makarov A. G., Mekler K. I., Melnikov P. I., Nikolaev V. S., Perin S. S., Polosatkin S. V., Postupaev V. V., Rovenskikh A. F., Sinitzky S. L.* Recent results on the GOL-3-II facility // *Transactions of Fusion Technology*, 1999, v.35, N1T, p.112.
 6. *Arzhannikov A. V., Astrelin V. T., Burdakov A. V., Ivanov I. A., Koidan V. S., Kuznetsov S. A., Konyukhov V. V., Makarov A. G., Mekler K. I., Nikolaev V. S., Novozhilov S. A., Perin S. S., Polosatkin S. V., Postupaev V. V., Rovenskikh A. F., Savchikov A. V., Sinitzky S. L.* Recent results on plasma heating and improved confinement at the GOL-3-II facility // *Transactions of Fusion Technology*, 2001, v.39, N1T, p.17.
 7. *Астрелин В. Т., Бурдаков А. В., Койдан В. С., Меклер К. И., Мельников П. И., Поступаев В. В., Щеглов М. А.* Эксперименты по двухступенчатому нагреву плотной плазмы на установке ГОЛ-3 // *ЖЭТФ*, 1998, т.113, с.897.
 8. *Combs S. K.* Pellet injection technology // *RSI*, 1993, v.67, p.1679.
 9. *Milora S. L., Houlberg W. A., Lengyel L. L., Mertens V.* Review of pellet fueling // *Nuclear Fusion*, 1995, v.35, p.657.
 10. *Кутеев Б.В.* Технология для термоядерных реакторов, базирующиеся на инъекции макрочастиц // *ЖТФ*, 1999, т.69, с.63.
 11. *Astrelin V. T., Burdakov A. V., Chebotaev P. Z., Filippov V. V., Koidan V. S., Mekler K. I., Melnikov P. I., Postupaev V. V., Rovenskikh A. F., Shcheglov M. A., Wuerz H.* Hot electron target interaction experiments at the GOL-3 facility // *Nuclear Fusion*, 1997, v.37, p.1541.
 12. *Астрелин В. Т., Бурдаков А. В., Поступаев В. В.* Подавление теплопроводности и генерация ионно-звуковых волн при нагреве плазмы электронным пучком // *Физика плазмы*, 1998, т 24, с.450.
 13. *Рютов Д. Д.* Газодинамика плотных плазменных сгустков в солениоде // *Препринт No. 90-143*, Новосибирск: ИЯФ СО АН СССР, 1990.