

УДК 533.95

ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЙ, ИСТЕКАЮЩИХ ИЗ ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА, В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА УСТАНОВКЕ ПФ-3

С.С. Ананьев, Е.П. Велихов, С.А. Данько, А.И. Жужунашвили, Ю.Г. Калинин, В.И. Крауз, В.В. Мялтон

НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Представлены оптические спектральные методики и результаты измерения температуры и концентрации плазмы в аксиальных струях, полученные в рамках экспериментов по лабораторному моделированию динамики астрофизических джетов, проводящихся на установке ПФ-3. Концентрация плазмы определялась по форме штарковских контуров спектральных линий, ионизационная температура — по отношению интенсивности спектральных линий атомов и ионов или по степени ионизации. Приведены значения концентрации и температуры плазмы струй из разных газов — водорода, гелия и неона на расстояниях 35 и 65 см от плазменного фокуса.

Ключевые слова: плазменный фокус, спектральные измерения, штарковское уширение, плазменная струя, неподвижная плазма, концентрация и температура плазмы.

PARAMETERS OF THE PLASMA STREAMS FROM THE PLASMA FOCUS IN EXPERIMENTS ON THE PF-3 FACILITY

S.S. Ananyev, E.P. Velikhov, S.A. Dan'ko, A.I. Zhuzhunashvili, Yu.G. Kalinin, V.I. Krauz, V.V. Myalton

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

Optical spectral methods and results of temperature and density measuring of the plasma in the axial jets are presented. The measurements were produced in experiments on laboratory simulation of the dynamics of astrophysical jets, performed at the facility PF-3. The plasma concentration was determined by the shape of the Stark contours of spectral lines, the ionization temperature was obtained from relative intensities of the spectral lines of atoms and ions, or from the degree of ionization. The values of the concentration and temperature of the plasma jets in various gases: hydrogen, helium and neon — at distances of 35 and 65 cm from the plasma focus are given.

Key words: plasma focus, spectral measurements, the Stark broadening, plasma jet, background plasma, plasma concentration and temperature.

DOI: 10.21517/0202-3822-2016-39-2-58-68

ВВЕДЕНИЕ

Одним из интенсивно развиваемых в настоящее время направлений физики плазмы является лабораторное моделирование астрофизических процессов, в частности, астрофизических джетов. Джеты относятся к числу одних из самых интригующих объектов, наблюдаемых во Вселенной. Они представляют собой мощные сильно коллимированные струи плазмы, зачастую релятивистские, испускаемые массивными аккрецирующими объектами и распространяющимися вдоль оси вращения аккреционного диска на расстояние, во много раз превышающее его диаметр. Существует множество моделей их происхождения, однако общепринятого удовлетворительного объяснения этому явлению до сих пор нет, верификация разрабатываемых различных численных кодов для описания механизмов генерации джетов по вполне понятным причинам либо чрезвычайно сложна, либо невозможна в принципе.

Одним из возможных вариантов решения проблемы динамики астрофизических плазменных струй является лабораторное моделирование, которое при соблюдении определённых законов подобия позволит осуществить экспериментальную проверку предлагаемых физических моделей и численных кодов, что неосуществимо в реальных условиях. Существенный прогресс в лабораторном моделировании астрофизических процессов достигнут в последние десятилетия, что связано с появлением целого класса новых установок с высокой плотностью энергии, разработанных в рамках программы инерциального управляемого синтеза [1, 2]. В частности, с развитием современных лазеров высокой мощности и Z-пинчевых систем появилась возможность проведения хорошо управляемых и хорошо диагностируемых лабораторных экспериментов по исследованию гидродинамических струй с высоким числом Маха. Так, в работе [3] на мощном лазере в лаборатории LULI (Ecole Polytechnique, Франция) было показано, что наложение полоидального магнитного поля может обеспечить эффективную коллимацию плазменного потока. Формирование плазменных потоков интенсивно исследуется на быстрых Z-пинчах: установки Z (Сандия, США), АНГАРА 5-1 (ТРИНИТИ, Троицк), SPHINX

(CEA GRAMAT, Франция) и др. [4—7]. Существенный прогресс в лабораторном моделировании астрофизических джетов достигнут на установке MAGPIE (Imperial College, Лондон, Великобритания). Промоделированы эффекты вращения, обнаруженные в джетах протозвёзд, взаимодействие высокоскоростных радиационно-охлаждаемых струй с окружающей средой, сформулированы возможные механизмы формирования джетов (например, «магнитная башня») и др. [8—14].

Необходимо отметить, однако, что в упомянутых экспериментах процесс распространения джета практически не рассматривается, а для разряда типа быстрый Z-пинч или для лазерного эксперимента обычным условием является генерация плазменных образований в достаточно высоком вакууме.

Одной из особенностей лабораторных исследований является то, что в реальном плазменном эксперименте, как правило, можно воспроизвести лишь нерелятивистские потоки. Это несколько сужает область джетов, доступных для моделирования. Обычно моделируются джеты молодых звёздных объектов или протозвёзд. В этом случае существенную роль играет фоновая плазма Вселенной, в которой эти джеты распространяются [15], и одним из ключевых параметров является так называемый «контраст» — отношение плотности джета к плотности среды, который в реальных условиях может варьироваться в достаточно широких пределах (от 0,1 до 10).

В НИЦ «Курчатовский институт» на установке ПФ-3 проводятся систематические исследования распространения плазменного потока, возникающего в области плазменного фокуса, по фоновой плазме, направленные на верификацию математических моделей и численных кодов, описывающих динамику космических джетов [16]. Специально сконструированная пролётная камера позволяет исследовать распространение потока на расстояния до 1 м от плазменного фокуса [17]. Для этих экспериментов характерно относительно высокое начальное давление газа в разрядной камере и дрейфовом пространстве (несколько торр), что позволяет смоделировать условия распространения джета, близкие к условиям во Вселенной по величине контраста.

Естественно, для целей проверки моделей и кодов, в частности, для определения основных безразмерных параметров лабораторного эксперимента, таких, как гидродинамическое и магнитное числа Рейнольдса, плазменное β и др., и их соответствия параметрам астрофизических джетов необходимо как можно тщательней исследовать временной ход различных параметров плазмы (концентрации, температуры, ионизационного состава и др.) как в самом потоке, так и в окружающей плазме. Эти эксперименты необходимо проводить в возможно более широком диапазоне условий эксперимента, в частности, для различных газов и на различных расстояниях от плазменного фокуса. Как мы увидим далее, в экспериментах требовалось обеспечить регистрацию динамики концентрации и температуры электронов при эволюции вещества от нейтрального газа до плазмы с максимальным значением концентрации до нескольких единиц на 10^{17} см^{-3} и электронной температурой до 10 эВ. При таких параметрах наиболее подходящими методами являются измерение концентрации плазмы по штарковскому уширению спектральных линий, а электронной температуры — по отношению интенсивностей спектральных линий нейтралов и ионов разной кратности ионизации. Естественно, это требует использования многоканальной системы регистрации спектров. С учётом того, что для регистрации изменения параметров плазмы на фронте струи временное разрешение диагностической системы должно быть $\sim 2 \cdot 10^{-8} \text{ с}$, то в качестве регистратора было необходимо использовать электронно-оптическую камеру, работающую в хронографическом режиме (щелевую развёртку). Проведение спектральных измерений усложнялось тем, что реальные струи характеризуются большой неоднородностью, наличием плазменных электрических шумов и значительным самопоглощением излучения в наиболее ярких линиях.

Результаты первых экспериментов по измерению спектроскопическими методами динамики электронной температуры и плотности гелиевой плазмы на расстоянии 35 см от плазменного фокуса были представлены в [18], подробное описание соответствующего диагностического комплекса, в том числе и калибровки чувствительности каналов, приведено в [19]. В представляемой работе, являющейся логическим продолжением [18], приведены результаты измерений временного хода параметров плазмы при работе на водороде, гелии и неоне на расстояниях 35 и 65 см от места зарождения потока — плазменного фокуса. Были также предприняты попытки решить проблемы, связанные с оптической толщиной плазмы. Для этой цели в некоторых случаях размер струи по линии наблюдения существенно уменьшался, а в других экспериментах в газ, определяющий динамику струи, в качестве диагностической при-

садки в малых количествах добавлялся другой газ, по характеристикам спектральных линий которого и определялись параметры плазмы.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Плазменная установка ПФ-3 работает следующим образом. Вначале, при срабатывании разрядника установки, между анодом и кольцевым катодом появляется высокое напряжение, которое создаёт пробой рабочего газа по поверхности ситаллового изолятора. Образовавшаяся токнесущая плазма под действием силы Ампера начинает двигаться между металлическими электродами и сжиматься к вертикальной оси симметрии разряда, на которой происходит пинчевание плазмы [20]. Плазменный пинч длиной ~ 5 см образуется вблизи анода и характеризуется температурой $T \sim 0,5$ кэВ и концентрацией $N \sim 10^{19}$ см $^{-3}$. Его образование сопровождается импульсом рентгеновского излучения и генерацией распространяющихся вдоль оси плазменных струй.

Для исследования динамики плазменного потока и фоновой плазмы на значительном удалении от анода к верхнему фланцу основной разрядной камеры установки ПФ-3 была присоединена пролётная камера, состоящая из трёх секций высотой по 300 и диаметром 210 мм каждая. В пролётной камере имеется набор диагностических окон, расположенных равномерно по периметру в середине каждой секции на расстояниях 35, 65 и 95 см относительно плоскости анода [17]. Рабочий газ заполняет как рабочую, так и пролётную камеры установки. Схема эксперимента показана на рис. 1.

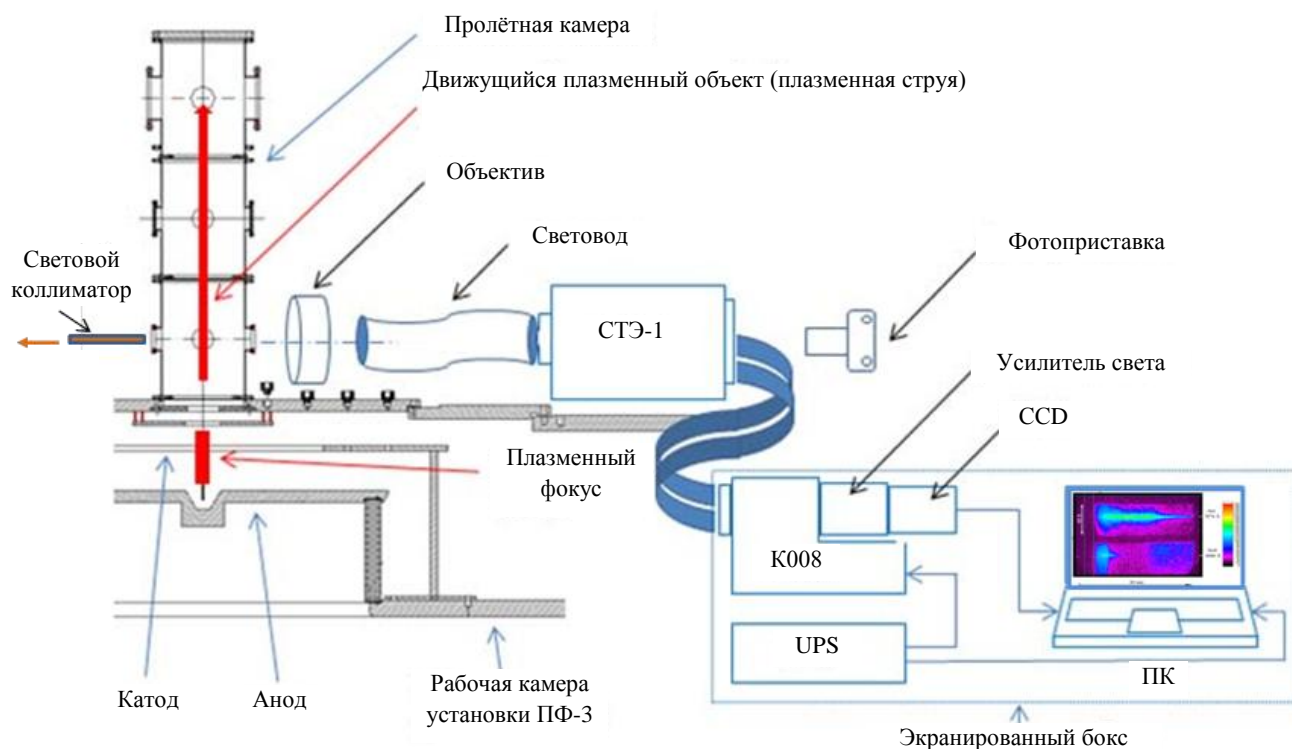


Рис. 1. Схема спектроскопических измерений на ПФ-3

Как было показано ранее [17], плазменная струя, генерируемая плазменным фокусом и распространяющаяся вдоль оси симметрии разряда, представляет собой некий ансамбль неоднородно светящихся сгустков размером от одного до нескольких сантиметров, хаотично распределённых в поперечном направлении, поперечные размеры сгустков для разных газов отличаются. Так, характерные размеры светящихся сгустков водородной плазмы составляют 2—7 см, что в 3—5 раз превосходит размеры сгустков в тяжёлых газах Ne и Ar.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ЧИСТЫМ ГЕЛИЕМ

Первые спектроскопические эксперименты, проведённые в чистом гелии, позволили определить концентрацию и температуру ионизованного неподвижного (фонового) газа и плазменной струи на удалении 35 см от плазменного фокуса [18]. Температура гелиевой плазмы в пролётной камере определялась по отношению интенсивностей двух линий, одна из которых $\lambda_1 = 5876 \text{ \AA}$ принадлежит нейтральному гелию, вторая $\lambda_2 = 4686 \text{ \AA}$ — его водородоподобному иону (рис. 2). Концентрация плазмы в различные моменты времени определялась по штарковскому уширению этих линий (рис. 3). Измерения показали, что до прихода струи ещё неподвижный газ на удалении 35 см от плазменного фокуса ионизируется импульсом рентгеновского излучения из пинча: оценка ионизационной температуры составляет 4 эВ, концентрация ионов в этот момент — $N_i \sim 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Примерно через 1 мкс происходит нарастание свечения спектральных линий, что связано, по-видимому, с приближающейся плазменной струей и воздействием её излучения с характерной энергией $h\nu \geq 20 \text{ эВ}$ на неподвижный газ.

В последующие 2,5 мкс обе используемые в измерениях линии гелия, как относящиеся к нейтральному атому, так и водородоподобному иону, постепенно уширяются. Такое уширение было интерпретировано как штарковское уширение, обусловленное увеличением концентрации ионов в плазме до $\sim 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Но, как уже нами отмечалось в работе [18], на форму линий может существенно повлиять их самопоглощение — значительная оптическая толщина приводит к существенному увеличению ширины наблюдаемого контура линии. Для уменьшения этого эффекта в экспериментах с чистым гелием размер плазмы вдоль направления наблюдения уменьшался с помощью дополнительной диафрагмы со щелью $1 \times 13 \text{ см}^2$, установленной в 1,5 см перед точкой наблюдения спектров по ходу движения струи (рис. 4), в поперечном направлении струя без диафрагмы имеет примерно круговое сечение диаметром $\sim 10 \text{ см}$.

Такое вырезание плазменного слоя не должно существенно повлиять на удельные параметры фоновой плазмы, создаваемой рентгеновским импульсом, несущественно изменит концентрацию и температуру плазменной струи непосредственно за щелью, но может искажать конфигурацию струи и сопутствующих ей магнитных полей, влиять на существующие в ней колебания и шумы.

Размер плазмы за диафрагмой по направлению наблюдения составляет около 1 см. Это при-

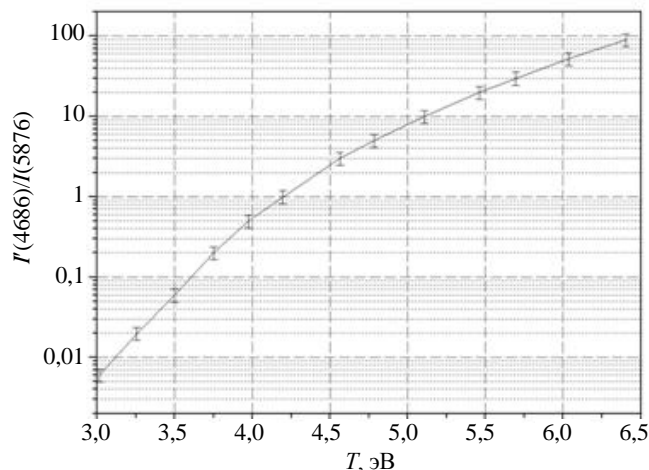


Рис. 2. Соотношение интенсивностей линий HeII 4686 Å и HeI 5876 Å в зависимости от температуры плазмы [21]

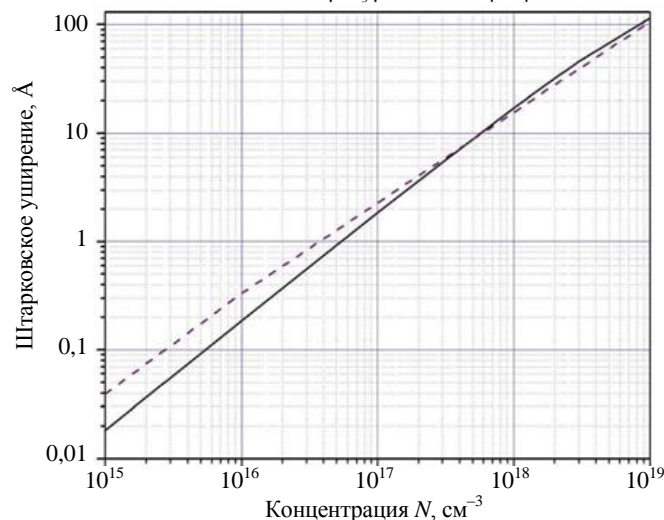


Рис. 3. Штарковская полуширина спектральных линий $\Delta_S \lambda$ в зависимости от концентрации плазмы при $T \sim 4 \text{ эВ}$: — HeI 5876 Å; - - - HeII 4686 Å [26]

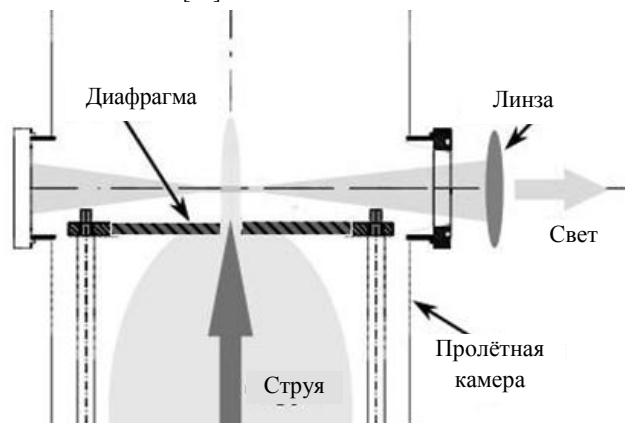


Рис. 4. Схема спектральных наблюдений в опытах с диафрагмой

водит к уменьшению длины пути поглощения для линии водородоподобного гелия $\lambda_2 = 4686 \text{ \AA}$ примерно на порядок, так как водородоподобные ионы гелия существуют преимущественно в плазме струи. Сложнее обстоит дело с линией нейтрального гелия $\lambda_1 = 5876 \text{ \AA}$, поглощение которой осуществляется нейтральным гелием, толщина слоя которого не уменьшилась. Для резонансной линии это обстоятельство означало бы, что оптическая толщина тоже ничуть бы не уменьшилась. Поглощение в линии 5876 \AA уменьшается за счёт того, что она относится к переходу между двумя возбуждёнными уровнями $3d \rightarrow 4p$. Её поглощение может происходить только в тех областях, где присутствует достаточное количество возбуждённых атомов гелия, т.е. в самой струе в неп полностью ионизованной гелиевой плазме и вне струи, где часть атомов по тем или иным причинам находится в возбуждённом состоянии. Отсюда следует, что в экспериментах со щелевой диафрагмой оптическая толщина и этой линии должна уменьшиться по сравнению с опытами без диафрагмы.

На рис. 5 представлена характерная щелевая развёртка линий нейтрального $\lambda_1 = 5876 \text{ \AA}$ и водородоподобного $\lambda_2 = 4686 \text{ \AA}$ гелия на удалении 35 см от плазменного фокуса в пуске № 5 (3 декабря 2015 г.) с ограничивающей толщину плазмы диафрагмой. На рис. 5 видно, что ширина верхней линии $\lambda_1 = 5876 \text{ \AA}$ на развёртке практически не увеличивается даже за 0,1 мкс до прихода струи, момент которого сопровождается резким увеличением яркости свечения на хронограмме. Если вычислить ширину линии $\lambda_1 = 5876 \text{ \AA}$ за 1 мкс до прихода струи, вычитая инструментальную ширину $\Delta_{\text{ins}}\lambda_1 \approx 1,32 \text{ \AA}$ из экспериментальной

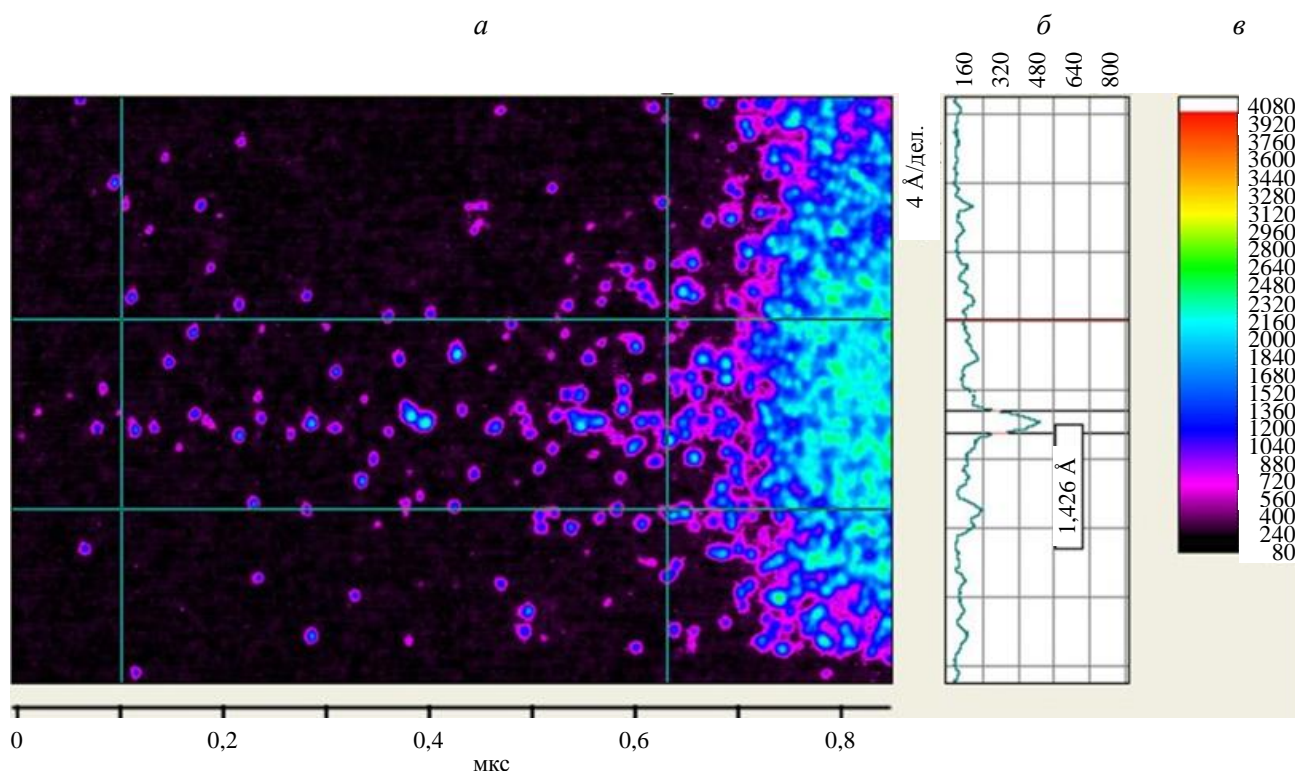


Рис. 5. Эксперимент № 15 (3 декабря 2015 г.) с ограничивающей толщину плазмы диафрагмой: рабочий газ — гелий, удаление от анода 35 см; вертикальные прямые линии на развёртках указывают временной интервал, которому соответствует профиль; а — увеличенный фрагмент щелевой развёртки линии 5876 \AA непосредственно перед приходом струи в условных цветах; б — профиль линии с указанием её полуширины в Ангстремах; в — шкала соответствия интенсивности свечения и цвета

$\Delta_{\text{exp}}\lambda \approx 1,43 \text{ \AA}$ по квадратичной формуле $\Delta_S\lambda_1 \approx (\Delta_{\text{exp}}^2\lambda - \Delta_{\text{ins}}^2\lambda)^{1/2} = 0,54 \text{ \AA}$, и считать полученное уширение целиком штарковским, обусловленным квазистатическим хольцмарковским полем ионов и ударным воздействием электронов, то концентрация плазмы практически не изменяется от начала свечения и по расчётам [21] даёт $N_i \approx 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Степень ионизации по отношению к начальной концентрации газа составляет $\sim 0,2$.

Таким образом, эксперимент с щелевой диафрагмой позволил измерить концентрацию неподвижной плазмы непосредственно перед приходом струи и установил, что уширение линий в эксперименте без диафрагмы обусловлено самопоглощением. Плазма струи характеризуется большой неоднородностью и

имеет очень широкий диапазон концентрации. В различные моменты времени она определялась по штарковскому уширению линий, её максимальное значение составляло $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. К сожалению, в самой струе плазма для рассматриваемых линий осталась оптически толстой, что определяет приведённое значение концентрации как оценку сверху. Электронная температура плазмы струи составила 4—8 эВ [18].

ПЛАЗМЕННЫЕ ШУМЫ

Непосредственно перед приходом струи в самой струе и её хвостовой части на профиле линий отчётливо прорисовываются симметричные относительно центра линии пички, характерные для высокочастотных ленгмюровских колебаний (рис. 6). Они видны как в экспериментах без ограничивающей щели [18], так и с сантиметровой щелью — на рис. 6 их положение указано стрелками. Частота ленгмюровских колебаний $\omega_{pe} [\text{с}^{-1}] = \sqrt{\frac{4\pi N_e e^2}{m_e}} = 5,64 \cdot 10^4 \sqrt{N_e [\text{см}^{-3}]}$ определяется концентрацией электронов N_e , здесь e — заряд и m_e — масса электрона. Диапазон концентраций, которые имеют сгустки плазмы и которые можно оценить «снизу» исключительно по частотам ленгмюровских колебаний, находится в пределах $N_i \sim 10^{15}—10^{16} \text{ см}^{-3}$. Такой большой разброс концентраций указывает на то, что плазма струи, образовавшаяся в пинче и распространяющаяся в дрейфовой камере, является сильно неоднородной как в радиальном, так и в продольном направлении.

На профилях линий гелия в короткие временные интервалы ($\sim 0,1$ мкс) отчётливо наблюдаются как провалы, так и пики. Они могут формироваться при совместном воздействии низкочастотных и высокочастотных (ВЧ) электрических микрополей [22—24]. Для того чтобы понять природу наблюдаемых колебаний, оценим уровень электрических полей по методике, которая основана на измеренных величинах: отклонению провала от

центра линии $\Delta\lambda_d$ и его полуширине, определяемой до соседнего пика $\Delta\lambda_{1/2}^d$. Для типичных экспериментальных параметров линии HeII 4686 Å, а именно $\Delta\lambda_d = 7,7 \text{ Å}$ и $\Delta\lambda_{1/2}^d \sim 1,2 \text{ Å}$ при $N_e = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, формула $\Delta\lambda_{1/2}^d = \frac{7 \cdot 10^9 E_{\text{ВЧ}}}{\omega_{pe}} \Delta\lambda_d$ из [25] даёт значение электрического поля ВЧ-колебаний $E_{\text{ВЧ}} \sim 50 \text{ кВ/см}$. Эта формула работает в случае сильных ВЧ-полей, превосходящих хольмарковское поле, т.е. $E_{\text{ВЧ}} > 2,6|e|N^{2/3} \sim 17 \text{ кВ/см}$. В плазме, характеризующейся небольшим количеством частиц N_D в дебаевской сфере, ВЧ-поля таких напряжённостей могут являться следствием обычных тепловых флуктуаций плотности заряженных частиц, т.е. быть «равновесными». Энергетический уровень тепловых шумов можно оценить из соотношения [25] $(E_0^2/4\pi)/N_e T \sim 1/N_D$ (в ед. СГСЭ), здесь $N_D = N_e r_D^3 = 4 \cdot 10^8 \sqrt{\frac{T^3}{N_e}}$; r_D — дебаевский радиус, см, температура подставляется в эВ, концентрация в см^{-3} . Для плазменной струи с температурой 5 эВ и концентрацией 10^{16} см^{-3} количество частиц составляет $N_D \approx 50$, и характерные электрические поля шумов такой плазмы получаются $E_0 \approx 50 \text{ кВ/см}$. Сравнение $E_{\text{ВЧ}}$ со сделанной оценкой E_0 указывает на то, что наблюдаемые шумы вполне могут иметь равновесное происхождение для исследуемой плазмы.

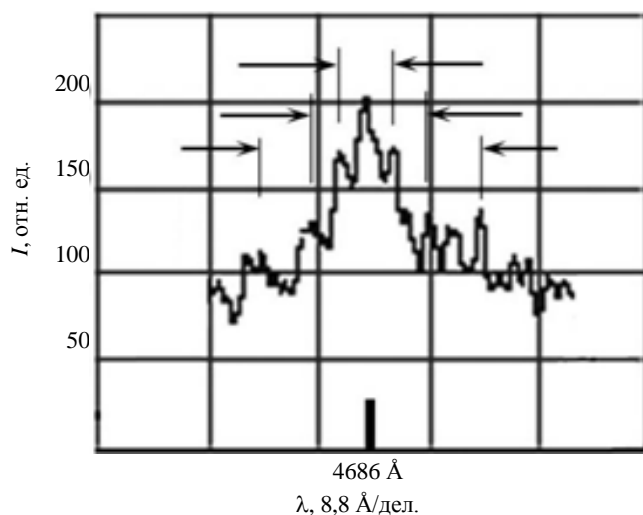


Рис. 6. Профиль линии гелия, изрезанный ленгмюровскими шумами

центра линии $\Delta\lambda_d$ и его полуширине, определяемой до соседнего пика $\Delta\lambda_{1/2}^d$. Для типичных экспериментальных параметров линии HeII 4686 Å, а именно $\Delta\lambda_d = 7,7 \text{ Å}$ и $\Delta\lambda_{1/2}^d \sim 1,2 \text{ Å}$ при $N_e = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, формула

$\Delta\lambda_{1/2}^d = \frac{7 \cdot 10^9 E_{\text{ВЧ}}}{\omega_{pe}} \Delta\lambda_d$ из [25] даёт значение электрического поля ВЧ-колебаний $E_{\text{ВЧ}} \sim 50 \text{ кВ/см}$. Эта формула

работает в случае сильных ВЧ-полей, превосходящих хольмарковское поле, т.е. $E_{\text{ВЧ}} > 2,6|e|N^{2/3} \sim 17 \text{ кВ/см}$. В плазме, характеризующейся небольшим количеством частиц N_D в дебаевской сфере, ВЧ-поля таких напряжённостей могут являться следствием обычных тепловых флуктуаций плотности заряженных частиц, т.е. быть «равновесными». Энергетический уровень тепловых шумов можно оценить из соотношения [25] $(E_0^2/4\pi)/N_e T \sim 1/N_D$ (в ед. СГСЭ), здесь $N_D = N_e r_D^3 = 4 \cdot 10^8 \sqrt{\frac{T^3}{N_e}}$; r_D — дебаевский радиус, см, температура подставляется в эВ, концентрация в см^{-3} . Для плазменной струи с температурой 5 эВ и концентрацией 10^{16} см^{-3} количество частиц составляет $N_D \approx 50$, и характерные электрические поля шумов такой плазмы получаются $E_0 \approx 50 \text{ кВ/см}$. Сравнение $E_{\text{ВЧ}}$ со сделанной оценкой E_0 указывает на то, что наблюдаемые шумы вполне могут иметь равновесное происхождение для исследуемой плазмы.

работает в случае сильных ВЧ-полей, превосходящих хольмарковское поле, т.е. $E_{\text{ВЧ}} > 2,6|e|N^{2/3} \sim 17 \text{ кВ/см}$. В плазме, характеризующейся небольшим количеством частиц N_D в дебаевской сфере, ВЧ-поля таких напряжённостей могут являться следствием обычных тепловых флуктуаций плотности заряженных частиц, т.е. быть «равновесными». Энергетический уровень тепловых шумов можно оценить из соотношения [25] $(E_0^2/4\pi)/N_e T \sim 1/N_D$ (в ед. СГСЭ), здесь $N_D = N_e r_D^3 = 4 \cdot 10^8 \sqrt{\frac{T^3}{N_e}}$; r_D — дебаевский радиус, см, температура подставляется в эВ, концентрация в см^{-3} . Для плазменной струи с температурой 5 эВ и концентрацией 10^{16} см^{-3} количество частиц составляет $N_D \approx 50$, и характерные электрические поля шумов такой плазмы получаются $E_0 \approx 50 \text{ кВ/см}$. Сравнение $E_{\text{ВЧ}}$ со сделанной оценкой E_0 указывает на то, что наблюдаемые шумы вполне могут иметь равновесное происхождение для исследуемой плазмы.

Результаты поляризационных измерений со щелевой диафрагмой шириной 1 см представлены на рис. 7. На нём приведены изображения развёрток линии гелия HeII 4686 Å для двух взаимно перпендикулярных поляризаций, а также профили линии, усреднённые за три временных интервала длительностью 1,5, 2 и 0,15 мкс.

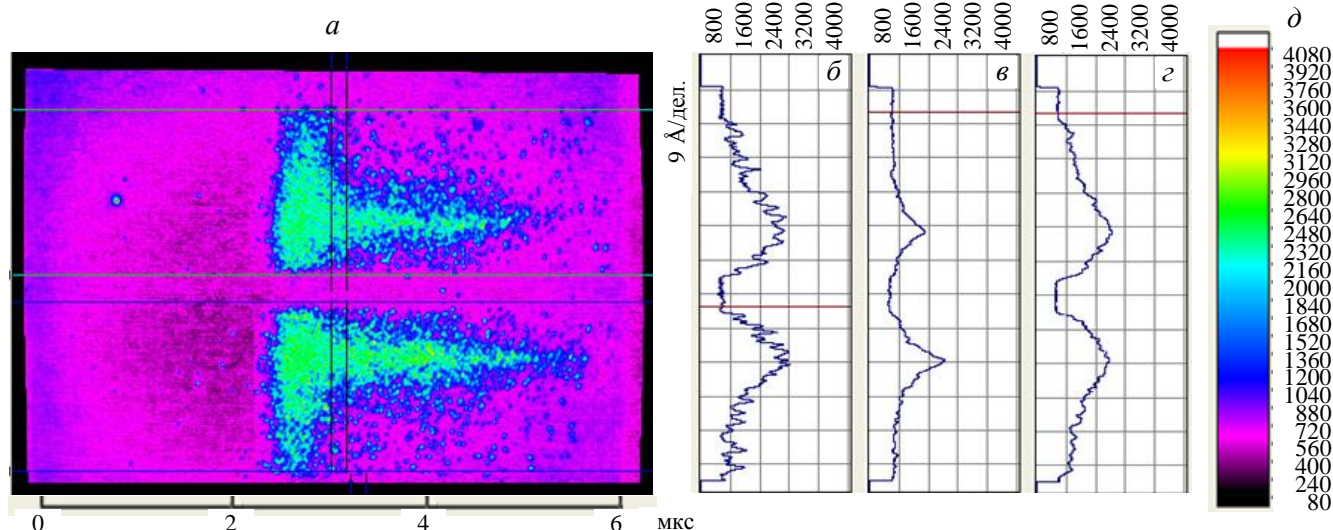


Рис. 7. Результаты поляризационных измерений: *a* — временная развёртка линии HeII 4686 Å в эксперименте № 4 (23 апреля 2015 г.) в условных цветах при ограничении толщины плазмы величиной 1 см с помощью щелевой диафрагмы: сверху — за поляризатором, пропускающим излучение с вектором **E**, направленным вдоль оси разряда, снизу — поперёк (длина волны на верхней части развёртки возрастает сверху вниз, а на нижней — наоборот); *б–г* — контуры линий, усреднённые в трёх временных интервалах от момента прихода струи: 0,7—0,8, 1,5—3,5 и 0—1,5 мкс соответственно; *д* — шкала соответствия интенсивности свечения (в отн. ед.) и цвета

Наличие диафрагмы со щелью, ограничивающей поперечный размер плазмы, даёт картину с меньшим влиянием самопоглощения. Это отчётливо видно на второй денситограмме (рис. 7, *в*), соответствующей хвостовой части струи, где форма линии близка к лоренцевской. Верхняя часть развёртки получена за поляризатором, пропускающим излучение с вектором **E**, направленным вдоль оси разряда. Заметно небольшое отличие в светопередаче световодов. На длительных временных интервалах (рис. 7, *в*, *г*) усредняются ВЧ-шумы и проявляется квазистатическая низкочастотная составляющая поля. Профиль линии (рис. 7, *б*), соответствующий относительно короткому интервалу времени 0,15 мкс, демонстрирует ВЧ-шумы. Форма линий на двух развёртках, амплитуда пиков и провалов на профиле очень похожи друг на друга, что говорит об изотропных шумах. Абсолютной идентичности профилей ожидать не приходится, поскольку на коротких временных выборках становится заметным недостаток фотонов для необходимой статистики. Представленные результаты поляризационных измерений являются ещё одним аргументом в пользу теплового характера наблюдаемых шумов.

СМЕСЬ НЕОНА С ГЕЛИЕМ

Был проведён эксперимент с рабочим газом, состоящим на 90% из неона и на 10% из гелия. Динамика плазмы здесь определяется неоном. Гелий выполняет функцию диагностической присадки. На рис. 8 пред-

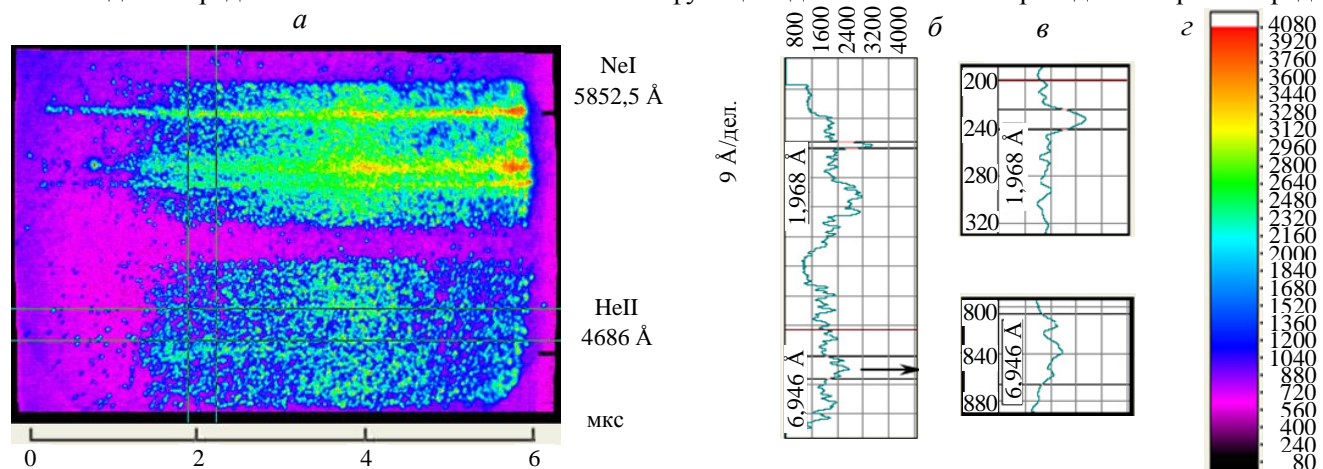


Рис. 8. Развёртка линий: *a* — щелевая развёртка двух линий в условных цветах в эксперименте № 22 (6 мая 2015 г.) с ограничивающей толщину плазмы диафрагмой; вертикальные прямые линии на развёртке указывают временной интервал, которому соответствует профиль, рабочий газ состоит на 90% (по давлению) из неона и на 10% из гелия, удаление от анода 35 см: сверху — участок спектра в окрестности линии NeI 5852,5 Å, снизу — участок спектра, содержащий линию HeII 4686 Å, *б* — профили спектральных интервалов с указанием ширины линий; *в* — увеличенные втрое профили линий; *г* — шкала соответствия интенсивности свечения (в отн. ед.) и цвета

ставлена развёртка линий в условных цветах в эксперименте № 22 (6 мая 2015 г.) с ограничивающей толщиной плазмы диафрагмой.

Инструментальная ширина составляет 1,4 Å. Верхняя часть развёртки — участок спектра в окрестности линии NeI 5852,5 Å, нижерасположенная слабая линия нейтрального гелия $\lambda_1 = 5876$ Å наложилась на другие неоновые линии. Длина волны на верхней части развёртки возрастает сверху вниз, а на нижней — наоборот. Нижняя часть развёртки — участок спектра, содержащий линию HeII 4686 Å, по которой измерялась концентрация плазмы. Чёрными стрелками показаны вставки, обранные прямоугольниками чёрного цвета, на которых представлены втрое растянутые по длине волны профили линий с указанием их полуширин. Линия NeI 5852,5 Å отчётливо видна на протяжении всей развёртки с момента пинчевания фокуса. Полуширина линии гелия, включая симметричные пики ленгмюровских шумов, в начале струи составляет $\Delta_{1/2}\lambda$ (HeII 4686 Å) ~ 3,4 Å, что по графику на рис. 9 соответствует концентрации плазмы $1,6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Температура в экспериментах на смеси неона с гелием не падает ниже 3 эВ до исчезновения линии водородоподобного иона 4686 Å. Температура оценена по среднему заряду ионов гелия в рамках ударно-столкновительной модели плазмы рис. 9. В пуске № 22 (6 мая 2015 г.) это интервал ~3 мкс от момента появления струи.

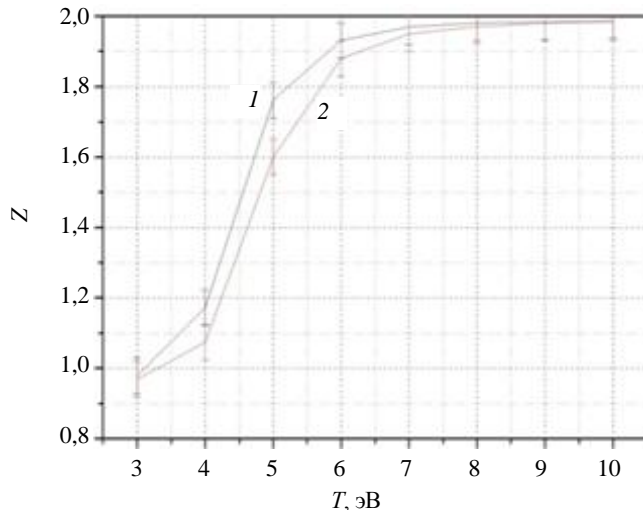
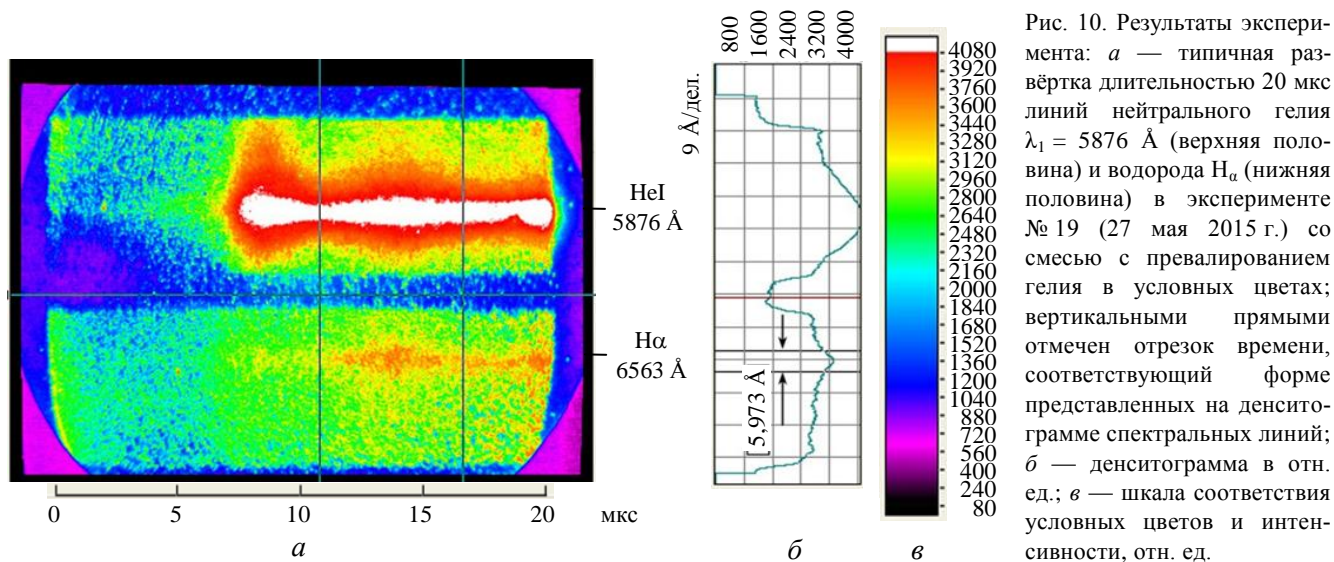


Рис. 9. Средний заряд иона гелия в зависимости от температуры, рассчитанный по ударно-излучательной модели для двух концентраций: 1 — $N_e = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, 2 — $N_e = 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ [27]

ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА СМЕСЯХ ВОДОРОДА И ГЕЛИЯ

Серия экспериментов была проведена на удалении от плазменного фокуса 65 см, что потребовало коррекции метода измерения параметров плазмы, успевшей остыть по дороге. Эта серия проводилась на водороде и гелии, смешанных в различных пропорциях. Ограничения на поперечный размер струи, установленные ранее с помощью диафрагмы с сантиметровой щелью, были сняты.

Концентрация гелия в смеси с его преобладанием измерялась по водородным линиям. Водород при невысокой температуре 1—2 эВ ещё не «выгорает», а газ в виде небольших примесей после каждого пуска установки поступает в рабочий объём со стенок вакуумной камеры, куда он почти навечно вбивается после экспериментов с ним. Полное давление смеси составляло 3 торр, часть водорода не превышала нескольких процентов. Нижнюю часть развёртки настроили на спектральный интервал, включающий в себя водородную линию H_α 6563 Å, верхняя соответствовала линии нейтрального гелия 5876 Å (рис. 10). Штарковская полуширина H_α в наиболее плотной части струи составляет 3,0 Å, что



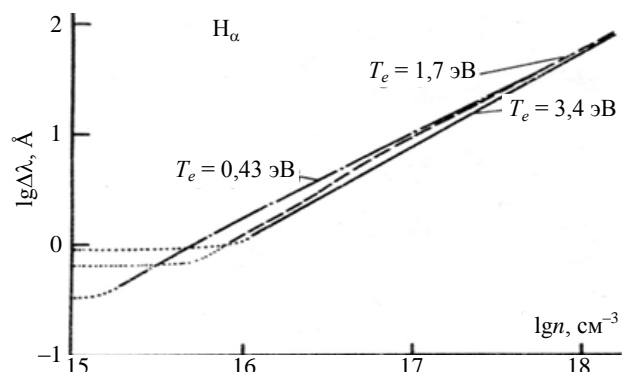


Рис. 11. Уширение водородной линии бальмеровской серии H_{α} [28]. Указана электронная температура для ЛТР: ---- — доплеровский предел для каждой температуры

Т а б л и ц а 1. Степень ионизации гелиевой плазмы, рассчитанная по ударно-излучательной модели при концентрации $1,6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$

№ п/п	Температура, эВ	Часть ионизованных атомов χ
1	1,4	0,083
2	1,45	0,125
3	1,5	0,175
4	1,55	0,231
5	1,6	0,289
6	1,8	0,507
7	2,0	0,699
8	2,2	0,843
9	2,4	0,920
10	2,6	0,954

согласно рис. 11 соответствует концентрации $N_e \approx 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Профиль линии в её центре несколько искажён, поэтому указанное значение концентрации является оценкой сверху. В табл. 1 представлена рассчитанная по ударно-излучательной модели [27] степень ионизации χ гелиевой плазмы. Поскольку полная концентрация гелия не может быть меньше начальной концентрации газа, которым заполнялась рабочая камера установки, то и степень ионизации $\chi < 0,19$, что соответствует $T_e \leq 1,5$ эВ. Отметим, что в этой серии экспериментов излучение водородо-подобного гелия не было замечено. Следующий эксперимент на удалении от плазменного фокуса 65 см был проведён с водородом, к которому теперь добавлялся гелий в качестве диагностической присадки. Гелий в рабочий газ добавлялся порциями по 5—7% от полного давления. При достижении гелием 15—25% от полного давления смеси интенсивность линии нейтрального гелия $\lambda_1 = 5876 \text{ \AA}$ была достаточно заметной, чтобы проводить измерения её ширины. По результатам эксперимента № 9 (15 мая 2015 г.) (рис. 12) в наиболее плотной части струи, которая зарегистрирована через 6—8 мкс после её начала, полуширина $\Delta_{1/2}\lambda$ ($\text{HeI } 5876 \text{ \AA}$) = 3,7 Å, что соответствует концентрации $N_e \approx 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. На рис. 12 виден характерный для самопоглощения провал на месте центра водородной линии H_{α} . В табл. 2 представлена степень ионизации χ

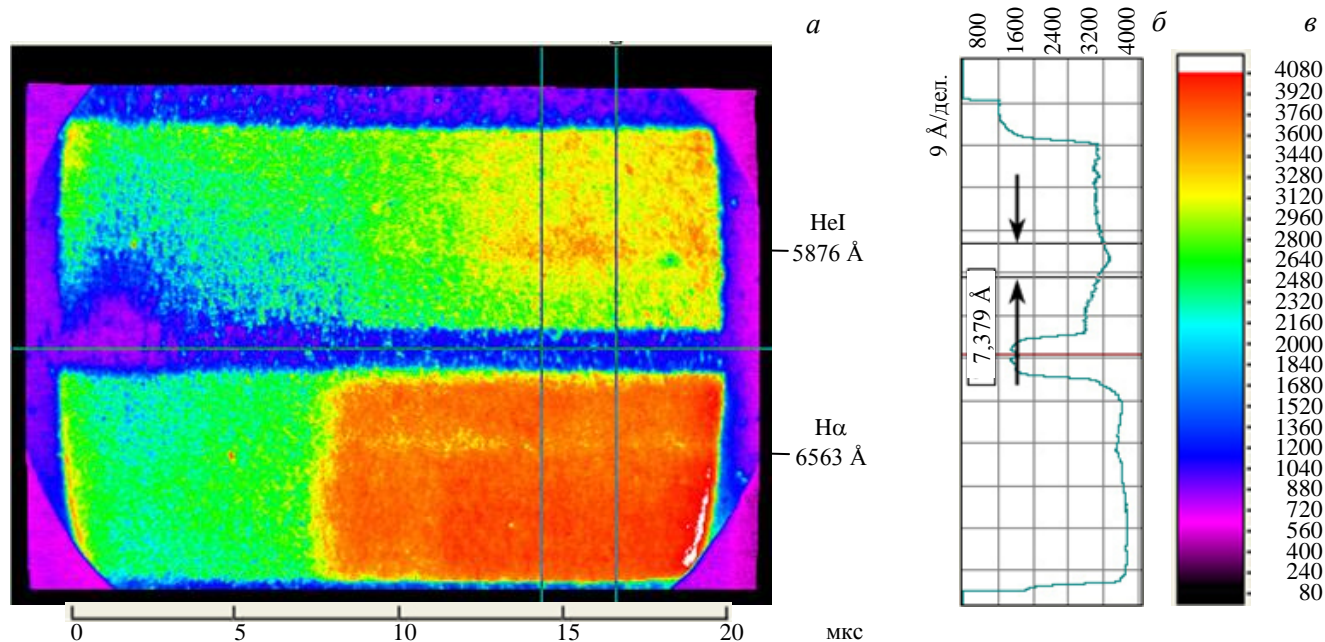


Рис. 12. Результаты экспериментов: *a* — типичная развёртка длительностью 20 мкс линий нейтрального гелия $\lambda_1 = 5876 \text{ \AA}$ (верхняя половина) и водорода H_{α} (нижняя половина) в эксперименте № 9 (28 мая 2015 г.) со смесью с превалированием водорода в условиях цветах, вертикальными прямыми отмечен отрезок времени, соответствующий форме представленных на денситограмме спектральных линий; *б* — денситограмма, отн. ед; *в* — шкала соответствия условных цветов и интенсивности, отн. ед.

Т а б л и ц а 2. Степень ионизации водородной плазмы при плотности $4,5 \cdot 10^{-7} \text{ г/см}^3$ (4 торр или $2,8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) согласно расчётам [27]

№ п/п	Температура, эВ	Часть ионизованных атомов χ
1	1	0,140
2	1,2	0,360
3	1,4	0,644
4	1,6	0,835
5	1,8	0,924
6	2	0,954
7	3	0,987

водородной плазмы при плотности $4,5 \cdot 10^{-7}$ г/см³ (4 торр или $2,8 \cdot 10^{17}$ см⁻³), рассчитанная по ударно-излучательной модели. Считая, что полная концентрация тяжёлых частиц после диссоциации молекул водорода не может быть меньше начальной в момент прихода струи, получаем оценку сверху для степени ионизации $\chi < 0,72$. Эта величина согласно табл. 2 соответствует $T_e \leq 1,5$ эВ. За концентрацию водорода в момент измерения взята начальная концентрация газа в атомном исчислении, которым заполнялась рабочая камера установки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На установке типа плазменный фокус ПФ-3 были проведены эксперименты по измерению температуры и концентрации плазмы в аксиальных струях, генерируемых при сжатии токнесущей оболочки. Эксперименты проведены с разными рабочими газами в интервале начального давления 2—4 торр при разрядных токах, имеющих амплитуду $\sim 1,5$ МА и длительность фронта менее 15 мкс.

Концентрация неподвижной гелиевой плазмы, определяемая по уширению линии хольцмарковским полем, практически не изменяется от начала свечения до прихода струи и составляет $N_i \sim 2 \cdot 10^{16}$ см⁻³. Плазма струи характеризуется большой неоднородностью и имеет очень широкий диапазон концентрации. Максимальное значение составляло $2 \cdot 10^{17}$ см⁻³. Концентрация плазмы в различные моменты времени определялась по штарковскому уширению линий электрическими полями различной природы. Электронная температура плазмы струи составила 4—8 эВ.

В эксперименте наблюдались ленгмюровские шумы, проявляющиеся в модуляции профиля отдельных спектральных линий гелия. Измерения установили отсутствие поляризации излучения, что соответствует тепловой природе наблюдаемых шумов.

Измерена концентрация ионов в собственно струе в эксперименте со смесью из двух газов — неона и гелия, первый из которых, преобладающий в смеси, определял динамику струи, а второй служил для диагностики по штарковской ширине линии. Её максимальное значение составило $2 \cdot 10^{17}$ см⁻³. Температура плазмы струи превысила 3 эВ.

Серия экспериментов проводилась на смесях водорода и гелия на большем удалении от плазменного фокуса (65 см). Температура плазмы струи уменьшилась до 1,5 эВ, концентрация ионов составила для разных соотношений газов в смеси от $5 \cdot 10^{16}$ до $1,5 \cdot 10^{17}$ см⁻³.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 14-02-00179-а и № 14-29-06085-офи_м.

REFERENCES

1. **Ryutov D.D., Remington B.A.** Scaling astrophysical phenomena to high-energy-density laboratory experiments. — *Plasma Phys. Contr. Fus.*, 2002, vol. 44, B407—B423.
2. **Remington B.A., Drake R.P., Ryutov D.D.** Experimental astrophysics with high power lasers and Z pinches. — *Rev. of Modern Phys.*, 2006, vol. 78, № 3, p. 75.
3. **Albertazzi B. et al.** — *Science*, 2014, vol. 346, pp. 325—328.
4. **Ryutov D.D., Derzon M.S., Matzen M.K.** The physics of fast Z-pinches. — *Rev. of Modern Phys.*, 2000, vol. 72, pp. 167—223.
5. **Aleksandrov V.V., Grabovskiy E.V., Zukakishvili G.G. et al.** — *Fizika plazmy (Plasma Physics)*, 2008, vol. 34, № 10, pp. 901—907 (in Russian).
6. **Aleksandrov V.V., Frolov I.N., Grabovskii E.V. et al.** — In: *Proc. of 15th Intern. Conf. BEAMS`2004. St. Petersburg, 2005*, pp. 834—837.
7. **Calamy H. et al.** — In: *8th Intern. Conf. on Dense-Pinches, DZP-2011. Biarritz, France, 5—9 June 2011*.
8. **Ampleford D.J. et al.** — *PRL*, 2008, vol. 100, p. 035001.
9. **Ciardi A., Lebedev S.V., Frank A. et al.** — *The Astrophysical J., Letters*, 2009, vol. 691, p. L147.
10. **Suzuki-Vidal F., Lebedev S.V., Bland S.N. et al.** — *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2010, vol. 38, p. 581.
11. **Suzuki-Vidal F. et al.** — *Physics of Plasmas*, 2012, vol. 19, p. 022708.
12. **Huarte-Espinosa M., Frank A., Blackman E.G.** — *The Astrophysical J.*, 2012, vol. 757, № 1, p. 66.
13. **Suzuki-Vidal F., Lebedev S.V., Krishnan M. et al.** — *High Energy Density Physics*, 2013, vol. 9, p. 141.
14. **Huarte-Espinosa M., Frank A., Blackman E.G. et al.** — *Ibid.*, p. 264.

15. **Beskin V.S.** — UFN (APhS), 2010, vol. 180, p. 12 (in Russian).
16. **Krauz V. et al.** — Physica Scripta, 2014, vol. T161, p. 014036.
17. **Anan'ev S.S., Dan'ko S.A., Myalton V.V., Kalinin Yu.G., Krauz V.I., Vinogradov V.P., Vinogradova Yu.V.** Investigation of the pulsed plasma flow, generated in non-cylindrical Z-pinch systems, by electron-optical methods. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2013, vol. 36, issue 4, pp. 102—110 (in Russian).
18. **Anan'ev S.S., Dan'ko S.A., Myalton V.V., Zhuzhunashvili A.I., Kalinin Yu.G., Krauz V.I., Ladygina M.S., Marcenko A.K.** Spectroscopic measurements of the parameters of helium plasma jets, generated by a plasma focus of PF-3 facility. — Fizika plazmy (Plasma Physics), 2016, vol. 42, № 3, pp. 282—290 (in Russian).
19. **Anan'ev S.S., Dan'ko S.A., Kalinin Yu.G.** Spectroscopic complex for registration of time dependence of plasma jets parameters on the PF-3 facility. — Pribory i tekhnika eksperimenta (Instruments and experimental technique) (in press) (in Russian).
20. **Krauz V.I.** Encyclopedia of low-temperature plasma. Ser. B. Vol. IX-2. High-energy plasmodynamics. Managing editor A.S. Kingsep. — M.: YANUS-K, 2007, pp. 152—195 (in Russian).
21. **Grim G.** Plasma spectroscopy. — M.: Atomizdat, 1969, p. 226. (Hans R. Griem. Plasma spectroscopy. — New York: McGraw-hill, 1964) (in Russian).
22. **Griem H.R., Kolb A.C., Shen K.Y.** — Phys. Rev., 1959, vol. 116, № 1, p. 4.
23. **Oks E.A., Rantsev-Kartinov V.A.** — Sov. Phys. JETP, 1980, vol. 52, № 1, p. 50.
24. **Sholin G.V.** — Reports of the USSR AS, 1970, vol. 195, p. 589 (in Russian).
25. **Shafranov V.D.** Problems of plasma theory. — M.: Gosatomizdat, 1963, vol. 3, p. 118 (in Russian).
26. **Grim G.** The broadening of spectral lines in plasma. — M.: Mir (World), 1978 (in Russian).
27. <http://nlte.nist.gov/FLY/>.
28. **Berezin A.B., Lyublin B.V., Yakovlev D.G.** Stark spectroscopy of hydrogen lines in a turbulent plasma. : Preprint NIIIEFA P-K-0609. Leningrad, 1983 (in Russian).

AUTHORS

Ananyev S.S. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Ananyev_SS@nrcki.ru
Velikhov E.P. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia;
Dan'ko S.A. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Danko_SA@nrcki.ru
Zhuzhunashvili A.I. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia;
Kalinin Yu.G. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Kalinin_Yu.G@nrcki.ru
Krauz V.I. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Krauz_VI@nrcki.ru
Myalton V.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia;

Received 22 October 2015
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2016, vol. 39, issue 2, pp. 58—68.