

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА ПРИМЕСЕЙ И ЭФФЕКТИВНОГО ЗАРЯДА ПЛАЗМЫ НА УСТАНОВКЕ ГОЛ-3

© 2015 г. Н. В. Сорокина^{*, **}, А. В. Бурдаков^{*, **}, И. А. Иванов^{*, ***},
С. В. Полосаткин^{*, **}, В. В. Поступаев^{*, ***}, А. Ф. Ровенских^{*}, А. А. Шошин^{*, ***}

^{*} Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

^{**} Новосибирский государственный технический университет, Россия

^{***} Новосибирский государственный университет, Россия

e-mail: n.v.sorokina@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 10.09.2014 г.

Окончательный вариант получен 28.01.2015 г.

В Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (Новосибирск) на установке ГОЛ-3 изучается нагрев плазмы и удержание ее в многопробочном магнитном поле. Плазма плотностью $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ нагревается релятивистским электронным пучком (1 МэВ, 8 мкс, до 200 кДж), в результате чего к моменту окончания инжекции электронного пучка температура плазмы достигает 1 кэВ. В работе представлены результаты экспериментов, целью которых является оценка концентрации и степени ионизации основных примесей в плазме и последующее определение их вклада в эффективный заряд плазмы установки ГОЛ-3. Плотности интересующих элементов определялись с помощью методов оптической спектроскопии в ВУФ и видимой спектральных областях, а также с помощью масс-спектрометрии остаточного вакуума. Для определения эффективного заряда плазмы результаты измерений сравнивались с данными численного моделирования динамики ионизационного баланса примесей. В результате показано, что вклад основных наблюдаемых примесей дает значение величины эффективного заряда, не превышающее $Z_{\text{eff}} = 1.8$, что не может объяснить наблюдаемое в экспериментах улучшенное удержание плазмы низкой плотности.

DOI: 10.7868/S0367292115070082

1. ВВЕДЕНИЕ

Многопробочное удержание плазмы является альтернативным подходом к изучению проблем управляемого термоядерного синтеза. Такой способ удержания был предложен в 1971 году Г. Будкером, В. Мирновым и Д. Рютовым [1]. Главная идея этого метода состоит в том, что высокотемпературная плазма удерживается в аксиально-симметричном магнитном поле с многопробочной структурой. Плазма, распределенная вдоль линий магнитного поля, вытекает от центра к концам установки через систему связанных пробочкотронов. Если длина свободного пробега ионов плазмы сравнима с размерами одной ячейки многопробочного поля, то возникает специфическая сила трения, влияющая на плазму со стороны магнитного поля, и скорость утекания плазмы существенно замедляется. В оптимальных условиях, когда

$$\lambda_i = l, \quad (1)$$

время удержания плазмы в многопробочной ловушке равно

$$\tau_i = R^2 \frac{L^2}{\lambda_i V_{Ti}} \quad (2)$$

где R — пробочное отношение, L — длина установки, l — длина одного пробочкотрона, λ_i — длина свободного пробега ионов, V_{Ti} — тепловая скорость ионов.

Теория многопробочного удержания и ранние эксперименты рассмотрены в [2]. В настоящее время многопробочный подход к удержанию плазмы изучается на установке ГОЛ-3 в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (Новосибирск) [3].

Одним из важных результатов, полученных в экспериментах на установке ГОЛ-3, является улучшенное удержание плазмы с низкой плотностью [4]. Было установлено, что эффекты многопробочного удержания плазмы проявляются при плотности плазмы, существенно меньшей предсказываемой теорией, учитывающей лишь куло-

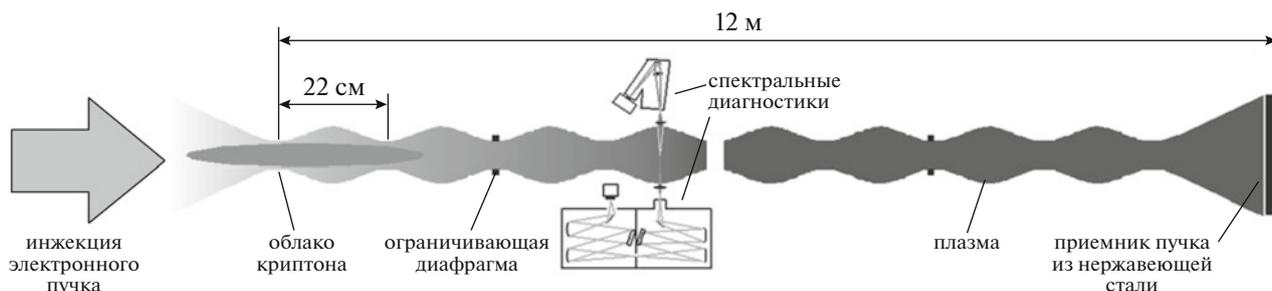


Рис. 1. Схема установки ГОЛ-3 и спектральных измерений.

новские столкновения, в соответствии с условием (1). Хорошее время удержания, наблюдаемое в экспериментах на ГОЛ-3, показывает, что эффективная частота столкновений в плазме превышает классическое значение в десятки раз. Объяснить это расхождение можно, предполагая, что частота столкновений увеличивается за счет турбулентности, вызванной плазменным потоком через многопробочную структуру. В то же время альтернативной интерпретацией такого явления может служить рассеяние ионов на многозарядных ионах примесей. Поэтому для корректного сравнения экспериментальных результатов с теорией необходимо знать величину эффективного заряда ионов в плазме ГОЛ-3. В работе будут представлены результаты спектральных измерений по определению концентраций примесей и приведены оценки вклада в эффективный заряд плазмы как легких, так и тяжелых примесей.

2. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА НА УСТАНОВКЕ ГОЛ-3

Установка ГОЛ-3 (рис. 1) представляет собой 12-метровый соленоид с гофрированным магнитным полем $B_{\max}/B_{\min} = 4.8/3.2$ Тл. В вакуумную камеру установки напускается рабочий газ (дейтерий), в котором зажигается прямой разряд, формирующий предварительную плазму с температурой 1–3 эВ. Стадия электрического разряда длится в эксперименте 30 мкс [5].

Нагрев плазмы осуществляется инжекцией в плазму с одного из концов установки релятивистского электронного пучка с энергией 1 МэВ, длительностью 10 мкс и током 20 кА. Электроны плазмы в сечении пучка быстро разогреваются до температуры 0.5–1 кэВ и остывают в течение примерно 1 мс после окончания инжекции пучка. При этом плотность плазмы составляет 10^{14} – 10^{16} см⁻³ [6, 7].

Основным подходом для обнаружения содержания примесей в плазме и оценки их концентрации является анализ спектра излучения плазмы и измерение интенсивностей спектральных линий

примесей. Для реализации этого метода на установке был создан комплекс оптических спектральных диагностик, ориентированных на изучение примесей [8]. Оптические обзорные спектрометры видимого и вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучения позволяют различать основные примеси в плазме и измерять мощность излучения их спектральных линий. Спектрометры с высоким разрешением служат для точного измерения длин волн наблюдаемых спектральных линий, анализа профиля линий и измерения динамики излучения спектральных линий. Кроме того, для анализа остаточного вакуума используется промышленный масс-спектрометр Pfeiffer Prisma QMG 220.

Следует отметить, что диаметр электронного пучка, инжектируемого в плазму, меньше диаметра плазменного столба, поэтому центральная горячая плазма окружена холодной плазмой. Применявшиеся в эксперименте спектральные диагностические регистрируют интенсивность излучения вдоль поперечных хорд плазменного столба (рис. 1), поэтому измеренный спектр включает в себя излучение как из центральной горячей плазменной области, так и с холодных краев, и в этом спектре доминируют спектральные линии низкоионизованных ионов. В приведенных ниже оценках предполагается, что концентрации примесей в центральной части плазмы и на ее краях одинакова. Это действительно справедливо для примесей, изначально однородно распределенных по всему вакуумному объему, но приводит к некоторому завышению концентрации для примесей, адсорбированных с поверхности лимитеров и вакуумной камеры.

3. ЛЕГКИЕ ПРИМЕСИ В ПЛАЗМЕ УСТАНОВКИ ГОЛ-3

Радиационные потери плазмы на установке ГОЛ-3 в основном определяются линейчатым излучением легких примесей (кислорода, азота, углерода), спектральные линии которых преобладают в спектре видимого и ВУФ-излучения. Для изучения спектра излучения из плазмы и измере-

ния мощности излучения для выбранных линий использовался абсолютно калиброванный ВУФ-спектрометр [9]. Сравнение измерений с результатами численного моделирования позволяют найти концентрации примесей и полные потери на излучение из плазмы.

Спектр излучения плазмы в ВУФ-диапазоне на разных стадиях разряда приведен на рис. 2. Наблюдаемые спектральные линии соответствуют ионам легких примесей (кислород, азот, углерод) в различных ионизационных состояниях, вплоть до литиеподобного. Сравнение со спектрами излучения, измеряемыми на других плазменных установках (JET [10], ASDEX [11], CASTOR [12]), показывает совпадение основных наблюдаемых спектральных линий.

В низкотемпературной плазме до инъекции пучка преобладают линии одно-двукратно ионизованного азота и кислорода. Во время инъекции пучка плазма быстро нагревается, и атомы примесей ионизируются, последовательно проходя различные ионизационные состояния. Характерное время ионизации атома кислорода до гелиеподобного состояния составляет 15 мкс для плазмы с плотностью $n_e = 0.5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$. В этот период в спектре преобладают линии высокоионизованных ионов OV, OVI, NIV, NV (рис. 2а). Через 50 мкс ионы ионизируются до водородоподобного состояния, и мощность излучения в ВУФ-диапазоне падает.

Через 100 мкс в область измерения приходит облако примесей с лимитера, и в спектре появляются линии низкоионизованного углерода (рис. 2б). В видимом спектре в этот период также наблюдаются линии иона CII и других содержащихся в лимитерах элементов (Li, Si). На поздних стадиях разряда в спектре преобладают водородные линии L_α и L_β (рис. 2в). Полная длительность свечения плазмы составляет около 800 мкс.

Измерения интенсивностей линий ионов позволяет оценить концентрацию примесей в плазме. Для уменьшения влияния на измерения концентрации электронов и электронной температуры (которая может различаться по сечению плазменного столба) мощность линейчатого излучения интегрировалась в течение времени ионизации ионов (10 мкс). Такой подход основан на том, что мощность излучения иона в плазме пропорциональна концентрации электронов и скорости возбуждения верхнего уровня перехода $S_{ex}(T) = \langle \sigma_{ex} \cdot v_e \rangle$, а время его существования при быстрой ионизации – обратно пропорционально концентрации и скорости ионизации $S_{ion}(T) = \langle \sigma_{ion} \cdot v_e \rangle$. В результате энергия излучения за время ионизации не зависит от концентрации электронов. Зависимость от температуры определяется отношением S_{ex}/S_{ion} , которая при температурах

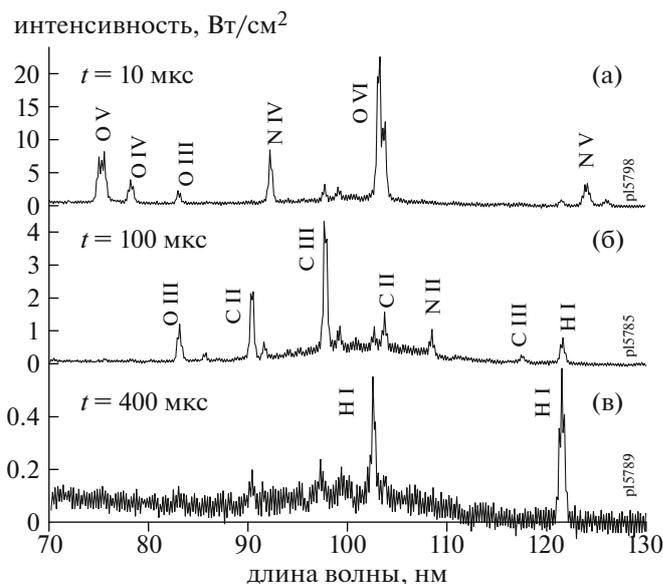


Рис. 2. Спектр свечения плазмы на разных стадиях разряда: а) – $t = 10$ мкс, быстрый нагрев плазмы и последовательная ионизация ионов примесей; б) – $t = 100$ мкс, приход облака примесей с лимитера; в) – $t = 400$ мкс, остывание плазмы.

плазмы, превышающих энергию ионизации иона, является медленно меняющейся функцией температуры. Так, для излучения линии иона кислорода OVI 103.3 нм при изменении температуры с 1000 до 500 эВ величина S_{ex}/S_{ion} изменяется на 25%.

Результаты измерений сравнивались с модельными расчетами динамики ионизации и излучения. Для расчетов применялся 1D транспортный код STRANL [13], в котором для вычисления кинетики ионизации и мощности линейчатого излучения использовалась информация о сечениях элементарных процессов (ионизация, рекомбинация, возбуждение) из базы данных ADAS [14]. Поскольку характерное время ионизации (10 мкс) существенно меньше времени пролета иона вдоль установки и его диффузии поперек магнитного поля, вычисления проводились в приближении, не учитывающем радиальный и продольный перенос ионов. Также предполагалось, что атомарный процесс перезарядки на атомах водорода мал в центральной области плазменного шнура.

На рис. 3б. показана расчетная динамика ионизационных состояний для атома кислорода. На стадии нагрева, когда температура плазмы достигает 1 кэВ (рис. 3а.), атомы примесей последовательно ионизируются вплоть до водородоподобного состояния, при этом проходя сильноизлучающие стадии с низкой ионизацией. После окончания инъекции плазма остывает, причем

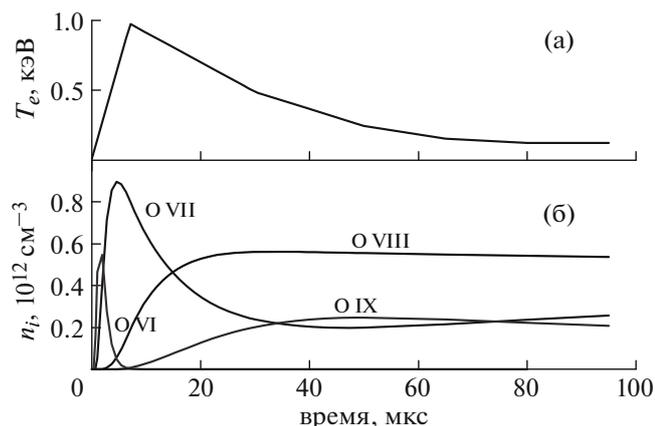


Рис. 3. Расчет динамики ионизационных состояний линий кислорода: а) — динамика электронной температуры, закладываемая в расчеты; б) — концентрация ионов кислорода в различных ионизационных состояниях.

характерное время спада температуры существенно меньше времени рекомбинации ионов. Поскольку скорость возбуждения и мощность линейчатого излучения спектральных линий быстро падают с уменьшением электронной температуры [15], то при остывании плазмы в ней образуется популяция высокоионизованных слабоизлучающих примесей.

Таким образом, основная часть излучения испускается во время нагрева плазмы на стадии ионизации примесей. При этом, поскольку скорость ионизации, как и мощность излучения, линейно зависят от концентрации электронов, при увеличении плотности плазмы ионизация примесей происходит быстрее, и полная энергия излучения остается практически неизменной. Аналогично, уменьшение максимальной температуры приводит к уменьшению мощности линий, которая компенсируется увеличением длительности нахождения иона в данном ионизационном состоянии. Сравнение измерений мощности излучения самых ярких ВУФ спектральных линий (соответствующих ионам O, C, N) с расчетами дает величину плотности примесей $\sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ для каждого сорта ионов, что дает вклад в значение эффективного заряда плазмы на уровне 0.2–0.6 [16].

4. ТЯЖЕЛЫЕ ПРИМЕСИ В ПЛАЗМЕ УСТАНОВКИ ГОЛ-3

В современных токамаках наибольшую опасность с точки зрения увеличения эффективного заряда в плазме представляют тяжелые примеси, которые могут достигать высоких степеней ионизации и давать значительный вклад в эффектив-



Рис. 4. Масс-спектр остаточного вакуума установки ГОЛ-3 (относительная концентрация).

ный заряд плазмы. К тяжелым примесям, появление которых можно ожидать в плазме установки ГОЛ-3, относятся аргон, криптон, натрий и кремний. Ниже приведены оценки возможной концентрации этих примесей в плазме.

Аргон

Анализ масс-спектра остаточного вакуума в камере установки ГОЛ-3 (рис. 4) показывает, что основным источником остаточного газа являются микротечи. В частности, масс-спектр содержит пик аргона, поступающего в камеру через микротечи из атмосферного воздуха. Совместный анализ масс-спектра и измерений давления остаточного вакуума дает начальную концентрацию аргона в плазме, равную $3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

Криптон

В обычном режиме работы установки ГОЛ-3 криптон напускается в область сжатия электронного пучка для обеспечения поперечной проводимости плазмы. Напуск производится импульсным клапаном за 5 мс до начала инжекции электронного пучка в плазму, так что продольный размер криптонового облака составляет около 1 м. В течение выстрела облако криптона локализовано вблизи конца установки и не проникает в основную плазму. Между выстрелами на установке криптон равномерно распространяется по вакуумному объему и частично откачивается вакуумной системой.

Динамика концентрации криптона в вакуумном объеме за время выстрелов в течение экспериментального дня представлена на рис. 5. Пики соответствуют пяти выстрелам установки. Начальная концентрация криптона в плазме составляет $(3-5) \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$.

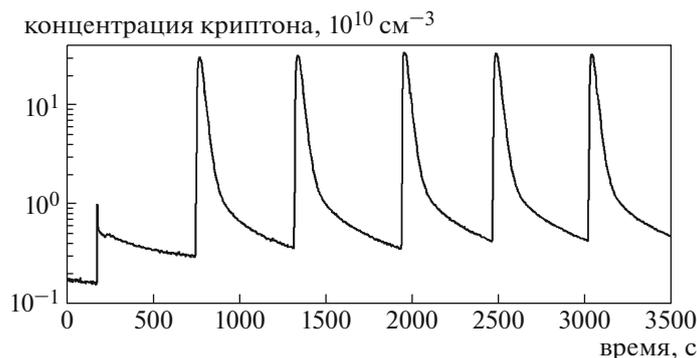


Рис. 5. Динамика концентрации криптона в вакуумном объеме во время работы установки ГОЛ-3.

Натрий

Спектральная линия атомарного натрия (588.9 нм) является одной из наиболее ярких линий свечения плазмы в видимом спектре (рис. 6) Источником натрия являются стеклокерамические диафрагмы (лимитеры), распределенные по всей длине установки и предназначенные для защиты внутрикамерных диагностик.

Приток в плазму нейтральных атомов натрия может быть оценен с помощью параметра S/XB — отношения скоростей ионизации и возбуждения

$$\Gamma_{\text{Na}} = \frac{\int I_{\text{Na}} dl}{\hbar\omega} \cdot \frac{S}{XB}, \quad (3)$$

где I_{Na} — плотность мощности излучения спектральной линии натрия, интегрирование ведется по глубине проникновения атома в плазму. Для спектральной линии Na I 588.9 нм при температуре 2–20 эВ величина параметра S/XB составляет около 0.01. Значение интеграла $\int I_{\text{Na}} dl$, найденное с помощью хордовых измерений интенсивности спектральных линий, составляет 0.2 Вт/см², что позволяет определить поток атомов натрия в плазме и найти верхнюю оценку для его концентрации — 5×10^{11} см⁻³.

Кремний

Кремний, также как и натрий, содержится в стеклокерамических лимитерах. В видимом спектре наблюдается яркий дублет однозарядного иона кремния Si II (634.7 нм и 637.1 нм).

Для кремния, в отличие от натрия, наблюдается линия иона, а не нейтрального атома. Ионы удерживаются магнитным полем и не могут свободно проникать в плазму, поэтому оценка концентрации по потоку с помощью величины S/XB является некорректной.

Концентрацию ионов кремния можно найти как

$$n_{\text{Si}} = \frac{\int I_{\text{Si}} dl}{\hbar\omega} \cdot \frac{1}{\langle \sigma_{ex} v_e \rangle n_e B l_{ch}}, \quad (4)$$

где $\langle \sigma_{ex} v_e \rangle$ — скорость возбуждения, B — коэффициент ветвления, l_{ch} — длина хорды наблюдения. Это выражение дает величину концентрации кремния, равную $n_{\text{Si}} = 10^{11}$ см⁻³.

5. ДИНАМИКА ИОНИЗАЦИОННОГО БАЛАНСА ТЯЖЕЛЫХ ПРИМЕСЕЙ

Для определения вклада тяжелых примесей в величину эффективного заряда плазмы требуется моделирование динамики ионизационного баланса для каждой примеси. Система уравнений, описывающих ионизационный баланс примесей, выглядит следующим образом:

$$\frac{dn_i}{dt} = n_e n_{i-1} S_{i-1} - n_e n_i S_i + n_e n_{i+1} A_{i+1} - n_e n_i A_i, \quad (5)$$

$$n_{\Sigma} = \sum_i n_i,$$

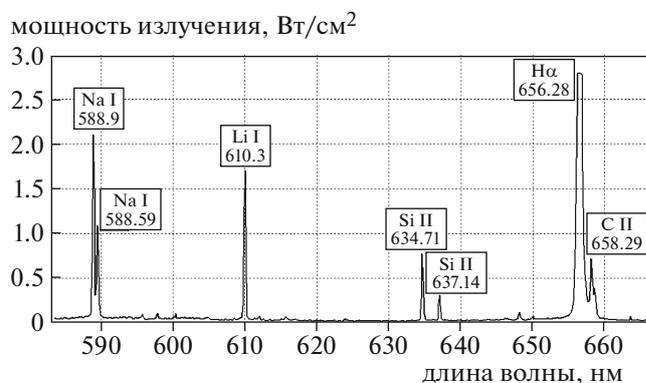


Рис. 6. Мощность излучения спектральных линий на установке ГОЛ-3.

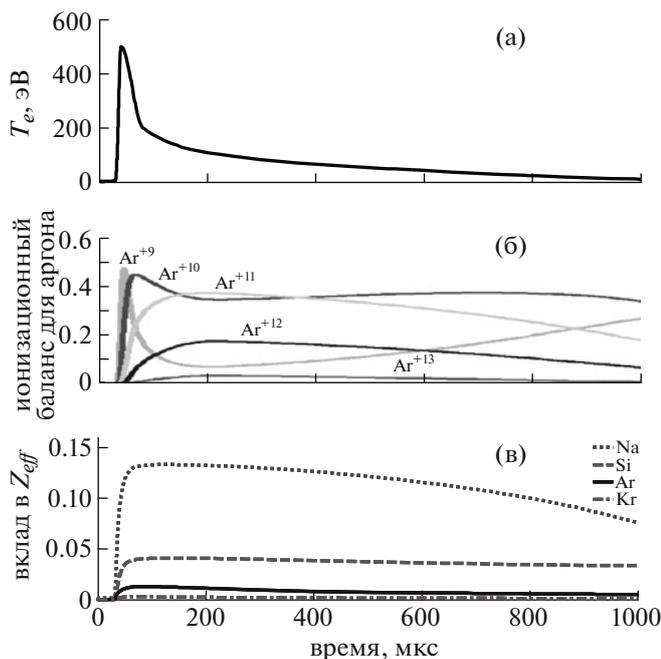


Рис. 7. Динамика электронной температуры (а), расчет ионизационного баланса для аргона (б), вклад тяжелых примесей в эффективный заряд плазмы (в).

где $n_i(t)$ — концентрация ионов примеси с зарядом i , n_Σ — полное содержание примеси в плазме, n_e — концентрация электронов, $S_i(n_e, T_e)$, $A_i(n_e, T_e)$ — скорости ионизации и рекомбинации, $T_e(t)$ — температура электронов. Предполагается, что содержание примесей и плотность электронов не зависят от времени и входят в уравнения как внешние параметры наравне с динамикой электронной температуры. Используемые в расчетах скорости ионизации (S) и рекомбинации (A) были взяты из базы данных ADAS [14], где содержатся наиболее точные данные о свойствах ионов и атомов для моделирования различных процессов, протекающих в плазме. Система уравнений (5) не учитывает процесс перезарядки многозарядных ионов на атомарном водороде, приводящий к некоторому снижению средней степени ионизации и эффективного заряда плазмы.

В качестве примера на рис. 7б представлено моделирование ионизационного баланса для аргона. В этих расчетах плотность электронов составляет $3 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$, а динамика температуры электронов, закладываемая в расчеты, показана на рис. 7а. При быстром нагреве плазмы электронным пучком ионы тяжелых примесей успевают в течение ~ 50 мкс достичь высоких степеней ионизации ($Z = 13$ для аргона). Поскольку скорость рекомбинации достаточно мала, ионы в этих ионизационных состояниях длительное время преобладают в остывающей плазме.

Подобные расчеты с теми же входными параметрами плазмы дают максимальную ионизационную степень для криптона — 18, для натрия — 10, для кремния — 13.

Затем, зная экспериментально определенные начальные концентрации примесей, можно рассчитать вклад каждой из них в эффективный заряд плазмы (рис. 7в). Максимальная величина их вклада составляет 1.3×10^{-2} для аргона, 3.3×10^{-3} для криптона и менее чем 0.13 и 0.05 для натрия и кремния.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерение плотности примесей и моделирование их ионизационного баланса позволяет оценить величину эффективного заряда ионов в плазме установки ГОЛ-3. Приведенные оценки не являются строгими, поскольку не учитывают реального распределения концентрации примесей и параметров плазмы по сечению плазменного столба, однако они могут служить в качестве верхних оценок для определения влияния рассеяния на примесях на удержание плазмы. Особенность установки ГОЛ-3 состоит в том, что плазма с высокой электронной температурой живет относительно мало. И вследствие этого тяжелые примеси не успевают достичь высоких степеней ионизации, и эффективный заряд плазмы определяется в основном легкими примесями. Оценка эффективного заряда плазмы, полученная из измерений концентрации легких примесей, дает величину $Z_{eff} = 1.2-1.6$. Измерения содержания тяжелых примесей и расчет их ионизационных состояний в плазме установки ГОЛ-3 показывают, что вклад тяжелых примесей в эффективный заряд плазмы менее, чем 0.2.

Величина Z_{eff} влияет на частоту столкновений и тем самым на полное время удержания плазмы. Хорошее удержание, наблюдаемое в экспериментах на установке ГОЛ-3, показывает, что эффективная частота столкновений в плазме более чем в 30 раз превышает классическое значение [17]. В результате исследований показано, суммарный вклад основных наблюдаемых примесей дает значение величины эффективного заряда, не превышающее $Z_{eff} = 1.8$, что не может объяснить наблюдаемое в экспериментах улучшенное удержание плазмы низкой плотности. Это означает, что рассеяние ионов плазмы на многозарядных ионах примесей не оказывает существенного влияния на удержание плазмы в многопробочной ловушке, а удержание плазмы определяется в основном коллективными эффектами.

Работа проведена при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки РФ (RFME-F161914X0003).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будкер Г.И., Мирнов В.В., Рютов Д.Д. // Письма в ЖЭТФ. 1971. 14. С. 212.
2. Mirnov V.V., Lichtenberg A.J. Rev. Plasma Phys. V. 19 / Ed. by B.V. Kadomtsev. New York - London: Consultants Bureau, 1996. P. 53.
3. Burdakov A., Azhannikov A., Astrelin V., Batkin V., Burmasov V., Derevyankin G., Ivanenko V., Ivanov I., Ivantsivskiy M., Kandaurov I., Konyukhov V., Kuklin K., Kuznetsov S., Makarov A., Makarov M., Mekler K., Polosatkin S., Popov S., Postupaev V., Rovenskikh A., Shoshin A., Sinitsky S., Stepanov V., Sulyaev Yu., Truney Yu., Vyacheslavov L., Zubairov Ed. // Fusion Sci. Technol. 2009. V. 55. I. 2T. P. 63.
4. Burdakov A., Arzhannikov A., Astrelin V., Beklemishev A., Burmasov V., Derevyankin G., Ivanenko V., Ivanov I., Ivantsivsky M., Kandaurov I., Konyukhov V., Kotelnikov I., Kovenya V., Kozlinskaya T., Kuklin K., Kuznetsov A., Kuznetsov S., Lotov K., Timofeev I., Makarov A., Mekler K., Nikolaev V., Popov S., Postupaev V., Polosatkin S., Rovenskikh A., Shoshin A., Shvab I., Sinitsky S., Sulyaev Yu., Stepanov V., Truney Yu., Vyacheslavov L., Zhukov V., Zubairov Ed. // Fusion Sci. Technol. 2007. V. 51. P. 106.
5. Бурдаков А.В., Койдан В.С., Меклер К.И., Полосаткин С.В., Поступаев В.В. // Физика плазмы. 2014. Т. 40. С. 223.
6. Аржанников А.В., Астрелин В.Т., Бурдаков А.В., Иванов И.А., Койдан В.С., Меклер К.И., Поступаев В.В., Ровенских А.Ф., Полосаткин С.В., Синицкий С.Л. // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 77. С. 358.
7. Аржанников А.В., Астрелин В.Т., Бурдаков А.В., Иванов И.А., Койдан В.С., Кузнецов С.А., Меклер К.И., Полосаткин С.В., Поступаев В.В., Ровенских А.Ф., Синицкий С.Л., Суляев Ю.С., Шошин А.А. // Физика плазмы. 2005. Т. 31. С. 506.
8. Акентьев Р.Ю., Бурдаков А.В., Иванов И.А., Полосаткин С.В., Поступаев В.В., Ровенских А.Ф., Шошин А.А. // ПТЭ. 2004. № 2. С. 98.
9. Бурдаков А.В., Weinzettl V., Piffel V., Полосаткин С.В., Поступаев В.В. // ПТЭ. 2004. № 2. С. 109.
10. Summers H.P., Anderson H., Badnell N.R., Bliet F., Brix M., de Heer F.J., Hoekstra R., Griffin D.C., Horton L.D., Maggi C.F., O'Mullane M.G., Pindzola M.Z. Electron and Neutral Interactions with Impurities in Divertor Plasma, Culham, 1997 (JET Joint Undertaking, JET-P(97)50).
11. Field A.R., Fink J., Dux R., Fussmann G., Wenzel U., Schumacher U. // Rev. Sci. Instrum. 2004. V. 66. P. 5433.
12. Weinzettl V., Burdakov A., Piffel V., Polosatkin S.V. // Proc. 30th Eur. Conf. Plasma Phys. and Control. Fusion, St.-Petersburg, Russia, 2003. P. 1–161.
13. Behringer K. Description of impurity transport code STRAHL. JET-R(87)08. JET Joint Undertaking, Culham, 1987.
14. Summers H.P., O'Mullane M.G., Whiteford A.D., Badnell N.R., Loch S.D. ADAS: Atomic data, modelling and analysis for fusion (5th ICAMDATA Conf.). AIP Conf. Proc. 2007. V. 901. P. 239.
15. Summers H. Atomic data and analysis structure (ADAS). JET-IR(94)06. JET Joint Undertaking, Culham, 1994.
16. Burdakov A., Ivanov I., Piffel V., Polosatkin S., Postupaev V., Rovenskikh A., Truney Yu., Weinzettl V., Zubairov Ed. // Fusion Sci. Technol. 2007. V. 51. I. 2T. P. 358.
17. Kotelnikov I.A. // Fusion Sci. Technol. 2007. V. 51. P. 186.