

Динамика накопления примесей в плазме стелларатора Л-2М

И. Ю. Вафин, А. И. Мещеряков

В работе описана методика, позволяющая измерять величину фактора превышения рентгеновского излучения над тормозным излучением чистой водородной плазмы и, таким образом, количественно оценивать наличие примесей в плазме в течение импульса. Методика основана на измерении полупроводниковыми детекторами интенсивности излучения мягкого рентгеновского излучения (МРИ) плазмы. Выполнено сравнение измерений фактора превышения предлагаемой методикой и традиционной методикой, основанной на измерении спектра МРИ. Представлены результаты наблюдений фактора превышения, измеренного с помощью предлагаемой методики в экспериментах по ЭЦР-нагреву плазмы на стеллараторе Л-2М. Измерения проводились в различных режимах работы установки.

Ключевые слова: физика плазмы, высокотемпературная плазма, стелларатор, боронизация, плазменные примеси, эффективный заряд плазмы, компьютерное моделирование, SXR-спектметрия.

Введение

Исследование процессов проникновения и накопления атомных и ионных примесей в высокотемпературной плазме, удерживаемой в тороидальных магнитных ловушках типа токамак и стелларатор, является важной задачей термоядерной проблемы. Интерес к этой теме был неизменным на протяжении всей истории термоядерных исследований. Так, уже на установках первого поколения исследовались потоки примесей со стенок: на токамаке ТМ-3 была обнаружена диффузия ионов углерода к оси плазменного шнура [1], а на стеллараторе Р-0 было показано, что, возбуждая ВЧ-полями альфвеновскую волну, можно уменьшить равновесную концентрацию примеси [2]. На токамаке TEXTOR [3] были проведены эксперименты, подтверждающие неоклассическую природу транспорта частиц тяжелых примесей, причём найдены условия, при которых появляется возможность избежать накапливания тяжелых ионов [4].

На токамаке ASDEX было обнаружено несколько режимов, с улучшенным удержанием

плазмы, при этом обнаружилось быстрое аккумулялирование примесей. Механизмом проникновения и накапливания тяжелых ионов предполагался неоклассический перенос [5]. Позднее методами численного моделирования и аналитическими расчетами было установлено, что в формировании радиального профиля концентрации примеси (для условий токамака ASDEX UPGRADE) более существенным является аномальный диффузионный поток, а в случае его подавления может преобладать неоклассический радиальный поток [6]. Параметры, влияющие на процесс накапливания примесей, исследовались и на установке JET. В экспериментах с центральным ионным циклотронным (ИЦ) нагревом было обнаружено, что центральный нагрев поддерживает пилообразные МГД-колебания плазмы. Это, в свою очередь, меняет энергетический баланс плазмы, изменяет транспорт примесей и в итоге, вероятно, затрудняет их накапливание, что прогнозировалось неоклассической теорией [7, 8].

Подобное явление, а именно, влияние пилообразных колебаний на распределение ионов примесей наблюдалось также и на токамаке Т-10 [9]. При этом следует отметить, что решение задачи минимизации примесей в плазме особо актуально для тороидальных ловушек стеллараторного типа, которые конструировались для работы в непрерывном режиме, что является основным и бесспорным преимуществом этих установок. Однако при непрерывном режиме работы накапливание ионов примесей в плазме неминуемо ведет к охлаждению. И надо отметить, что аккумулялирова-

Вафин Ильдар Юсуфович, с.н.с., к.ф.-м.н.
Мещеряков Алексей Иванович, зав. лаб., к.ф.-м.н.
Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН.
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.
Тел. 8(499) 135-80-19.
E-mail: meshch@fpl.gpi.ru, ildar@fpl.gpi.ru

Статья поступила в редакцию 28 марта 2018 г.

ние примесей действительно наблюдалось в стеллараторах LHD, Wendelstein7-AS, но в ходе экспериментов на этих установках были обнаружены режимы, при которых удастся избежать этого явления [10].

На стеллараторе Л-2М В Институте общей физики им. А. М. Прохорова РАН неоднократно исследовалось поведение примесей. Здесь необходимо оговорить тот факт, что до 1992 г. работы велись на стеллараторе Л-2 (т. е. на предшественнике установки Л-2М). В 1992 г. у стелларатора Л-2 была заменена вакуумная камера, которая отличалась от прежней лишь количеством патрубков. После этого установка Л-2 была переименована в Л-2М. В части вакуумной системы никаких конструктивных изменений не было проведено, поэтому авторы считают возможным сослаться на результаты, полученные и на установке Л-2.

В режиме нагрева плазмы индукционным током изучение поведения примесей в стеллараторе Л-2 проводилось посредством спектральных измерений в видимой области спектра и кварцевой ультрафиолетовой области в диапазоне от 200 нм до 350 нм. В процессе экспериментов наблюдались линии ионов кислорода (O^{+3} , O^{+5}), углерода (C^{+2} , C^{+4}), железа (Fe^{+13} , Fe^{+15}), определялся поток примесей в плазме [11].

После перехода к бестоковому режиму нагрева плазмы, который был осуществлен с помощью СВЧ-излучения гиротрона на второй гармонике электронной циклотронной частоты (ЭЦР) нагрева необыкновенной волны [12], вновь возникла настоятельная потребность в изучении поведения примесей, но уже в новых условиях. Необходимые измерения были проведены с помощью двух монохроматоров в диапазоне вакуумного ультрафиолетового излучения (от 15 нм до 160 нм) и кварцевого ультрафиолета (от 200 нм до 350 нм). В результате наблюдалось распределение интенсивностей линий кислорода O^{+3} , O^{+4} , O^{+5} , углерода C^{+3} , C^{+4} , железа Fe^{+15} . Было обнаружено, что при ЭЦР-нагреве наблюдаемые потоки примесей по величине примерно такие же, что и при режиме нагрева индукционным током, с тем лишь отличием, что перенос ионов примесей может быть описан в рамках неоклассической теории, т. е. без добавления аномальных потоков [13].

С введением процедуры боронизации внутренних стенок металлической вакуумной камеры существенно изменился состав плазмы. Из спектральных измерений в ультрафиолетовом и видимом диапазонах было определено, что вклад тяжелых примесей – железа, никеля и хрома – в излучение стало пренебрежимо мало.

Целью данной работы являлось исследование на стеллараторе Л-2М сплошного спектра

мягкого рентгеновского излучения (МРИ), диапазон которого начинался с энергии 1 кэВ, что позволяет наблюдать аккумуляцию примесей по радиусу плазменного шнура. Кроме того, наблюдения в этом диапазоне ведутся непрерывно в течение всего времени работы данной установки.

Условия проведения эксперимента

Эксперименты проводились в тороидальной магнитной ловушке стеллараторного типа «Л-2М» [14]. Детектирование МРИ осуществлялось прибором «Диарен». Излучение принимается вдоль 11 хорд в поперечном сечении тороидальной камеры стелларатора.

В многохордовой диагностике используются кремниевые поверхностно-барьерные диоды типа ORTEC, работающие в режиме измерения интенсивности излучения. Прибор состоит из линейки детекторов, блока предусилителя, аналого-цифрового преобразователя. Блоки детектирования и предусилителя отделены от вакуумной части стелларатора бериллиевой фольгой толщиной в 50 мкм. Используя метод фольг, данный прибор дает возможность получить в одном импульсе распределение температуры электронов по поперечному сечению плазменного шнура и ход его (распределения) во времени. В данной работе он использовался и для получения профиля электронной температуры, а также впервые для наблюдения эволюции фактора превышения.

Алгоритм расчета фактора превышения по излучению в мягком рентгеновском диапазоне высокотемпературной плазмы стелларатора Л-2М

Один из способов получить информацию о наличии примесей, динамике изменения их концентраций заключается в измерении фактора превышения ζ . Фактором превышения называется величина, которая показывает, насколько континуум рентгеновского излучения экспериментальной плазмы превышает континуум рентгеновского излучения чистой водородной плазмы [15]:

$$\zeta = (I_{bp} + I_{rp}) / I_{bn}, \quad (1)$$

где I_{bp} и I_{rp} – соответственно спектральные интенсивности тормозного и рекомбинационного излучения полученной в эксперименте плазмы, I_{bn} – спектральная интенсивность тормозного излучения чистой водородной плазмы. Для измерений параметра ζ использовалась диагностика

МРИ «Диарен». Очевидным достоинством диагностики является способность работать в токовом режиме: в каждый момент времени прибор, принимая поток квантов, регистрирует мощность излучения в диапазоне МРИ и формирует аналоговый сигнал u_e .

На начальном этапе вычислений фактора превышения в эксперименте определялись необходимые параметры плазмы: 1) профиль концентрации частиц, 2) профиль электронной температуры, 3) электрическое напряжение сигнала. Субмиллиметровым интерферометром Майкельсона диагностировался профиль концентрации частиц плазмы. С помощью диагностики «Диарен» методом фольг определялся профиль электронной температуры. На выходе диагностики «Диарен» фиксировалось значение напряжения сигнала u_e , величина которого обусловлена мягким рентгеновским излучением из плазмы и пропорциональна его мощности. Поскольку профиль концентрации частиц плазмы определялся по нескольким импульсам, то и профиль электронной температуры, и величина сигнала, которые использовались в расчетах, были получены осреднением температурных профилей примерно 10–15 импульсов.

На втором этапе – этапе компьютерного моделирования – вычислялся спектр тормозного излучения чистой водородной плазмы [15], концентрация частиц и электронная температура которой такие же, как и в плазме, полученной в эксперименте. При этом в расчетах плазменный шнур брался в виде цилиндра, причем излучающая на детектор область плазмы разбивалась на микрообъемы, которые представляли собой вложенные цилиндрические поверхности толщиной Δr , в пределах которых параметры плазмы (концентрация частиц и электронная температура) считались постоянными. Кроме того, в процессе компьютерного моделирования принимались в расчет все определяющие процесс излучения геометрические параметры, в их числе виньетирование потока излучения. Последующим интегрированием спектра по энергиям были вычислены мощность рентгеновского излучения $E_{hv}(t)$, а также значение возбуждаемого в цепи детектора тока:

$$i = E_{hv}(t) e \eta \frac{S}{\varepsilon} \quad (2)$$

где $E_{hv}(t)$ – плотность потока энергии рентгеновского излучения в килоэлектронвольтах в секунду, приходящийся на квадратный сантиметр; e – заряд электрона в кулонах; η – эффективность поглощения квантов в чувствительной части детектора; S – площадь чувствительной области детектора в квадратных сантиметрах; ε – энергия, расходуемая

в чувствительной области детектора на генерацию пары носителей заряда в килоэлектронвольтах (для кремния $\varepsilon = 0,0036$ кэВ). После этого по известному сопротивлению электрической цепи прибора «Диарен» определялась величина напряжения сигнала u_H . Рассчитанный таким путем сигнал u_H соответствовал излучению чистой водородной плазмы. На последнем этапе из соотношения сигналов, полученного экспериментально u_e и рассчитанного u_H , определялся фактор превышения ζ :

$$\zeta = \frac{u_e}{u_H} \quad (3)$$

Расчеты проводились для двух моментов времени – 55 мс и 60 мс, соответствующих середине и окончанию импульса нагрева для центральной хорды. На вход компьютерной программы подавались профили плотности и электронной температуры, значение измеренного в эксперименте сигнала напряжения. На выходе программы были получены значения фактора превышения.

Мощность нагрева в экспериментах менялась от 130 кВт до 280 кВт, средняя по центральной хорде электронная концентрация менялась в пределах от $n_{em} = 1 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ до $n_{em} = 2 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Результаты эксперимента

Ранее фактор превышения вычислялся при помощи спектрометра МРИ, т. е. сравнением рассчитанного спектра и измеренного в эксперименте. По этой методике для набора достоверного экспериментального спектра требуется во время импульса установки выбрать интервал времени, в течение которого параметры плазмы считаются неизменными. Кроме этого, в силу ограниченной статистической загрузки спектрометра, набор спектра производится в течение 10–20 рабочих импульсов установки. Таким образом, временное разрешение традиционной методике позволяет измерять одно значение фактора превышения за несколько импульсов. Однако с помощью предлагаемой методике удается вычислять фактор превышения в каждый момент времени в течение одного импульса и таким образом наблюдать за динамикой накопления ионов примесей.

Сопоставление значений фактора превышения, измеренных традиционной и новой методиками, дает хорошее согласие. Так, для гелиевой плазмы значение ζ , измеренное спектрометром, оказалось равным примерно 8, а для водородной примерно 2. Аналогичные измерения с помощью новой методике дали значение $\zeta \approx 5$ для гелиевой плазмы и $\zeta \approx 2$ для водородной плазмы. С учетом точности измерений (относительная погрешность

составляет $\pm 60\%$) видно, что полученные значения согласуются удовлетворительно. Относительная погрешность измерений складывается из относительных погрешностей измерений профиля концентрации электронов $\sim 20\%$ (интенсивность рентгеновского излучения, по которой измеряется фактор превышения, пропорциональна квадрату концентрации электронов), профиля электронной температуры $\sim 10\%$ и интенсивности мягкого рентгеновского излучения $\sim 10\%$. Точность метода будет улучшаться при уменьшении относительной погрешности измерений концентрации электронов и их температуры.

В табл. 1 и 2 представлены параметры экспериментов и результаты, полученные в режимах работы стелларатора для водородной плазмы.

В табл. 1 приняты следующие обозначения: ζ – фактор превышения на 55-й или 60-й мс (в середине и в конце импульса СВЧ), P_n – мощность ЭЦР нагрева в кВт, n_{em} – средняя по центральной хорде концентрация частиц на 55-й или 60-й мс в м^{-3} , N – количество дней, прошедших после проведения процедуры боронизации. Полученные результаты и условия, определяющие эксперимент представлены в таблицах, где каждому режиму отвечает экспериментальный день с неизменными параметрами эксперимента.

Условия эксперимента отражены в табл. 2. В таблице использованы следующие обозначения: T_e – достигнутая электронная температура в кэВ, P_{rad} – мощность радиационных потерь в кВт, измеренная с помощью болометра.

Таблица 1

Параметры экспериментов

Обработанные дни	n_{em} на 55-й мс	n_{em} на 60-й мс	P_n , кВт	N	ζ на 55-й мс	ζ на 60-й мс
режим № 1	$1,54 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$	$1,51 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$	150	3	2	2
режим № 2	$1,6 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$	$1,55 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$	150	4	2	2
режим № 3	$1,7 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$	$1,8 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$	165	5	2	3
режим № 4	$1,1 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$	$1,3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$	165	1	4	6
режим № 5	$1,3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$	$1,2 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$	165	2	2	3
режим № 6	$1,5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$	$1,7 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$	220	2	14	12
режим № 7	$1,7 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$	$2 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$	280	3	11	11

Таблица 2

Условия экспериментов

Обработанные дни	T_e на 55-й мс, кэВ	T_e на 60-й мс, кэВ	P_{rad} кВт на 60-й мс
режим № 1	0,64	0,64	20
режим № 2	0,62	0,62	20
режим № 3	0,58	0,56	30
режим № 4	1	0,9	25
режим № 5	1	0,9	23
режим № 6	0,66	0,58	90
режим № 7	0,66	0,58	120

Из табл. 1 видно, что фактор превышения практически не меняется в течение импульса. Это подтверждают также данные, полученные из спектрометрических измерений (свечение линий бора, углерода), а также измерений радиационных потерь. В первый день фактор превышения может быть достаточно высоким и затем в течение нескольких дней после боронизации уменьшаться. Возможно, это связано с постепенным удалением из рабочей камеры стелларатора остаточных продуктов боронизации.

Заключение

В работе разработана новая методика измерения фактора превышения рентгеновского излучения над тормозным излучением чистой водородной плазмы. Методика позволяет проводить наблюдения динамики накопления примесей в течение одного импульса, в отличие от ранее использованной.

Проведенные вычисления фактора превышения показали, что значение этой величины

практически не изменяется в течение импульса во всех рассмотренных режимах (изменения происходят в пределах точности измерений). Из этого следует, что во время импульса установки в центре плазменного шнура значительной аккумуляции примесей не происходит.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гервидс В. И., Крупин В. А. // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 18. Вып. 2. С. 106.
2. Демирханов Р. А., Киров А. Г., Ручко Л. Ф., Сукачев А. В. // Письма в ЖЭТФ. 1983. Т. 37. Вып. 8. С. 381.
3. Samm U. // Fusion Science and Technology. 2005. Vol. 47. P. 73.
4. Tokar M. Z., Rapp J., Bertschinger G., Konen L., Koslovski H. R., Kramer-Flacken A., Philipps V., Samm U., Unterberg B. // Nuclear Fusion. 1997. Vol. 37. No. 12. P. 1691.
5. Ran L. B., Roberts D. E., Yang H. R., Dobel G., Gentle K., Von Goeler, Holzhauser E., Hubner K., Keilhacker M., Korotkov A., Luce T. C., Miura Y., Tsois N., Wurtz H. // Journal of Nuclear Materials. 1989. Vol. 162-164. P. 14.
6. Кавеева Е. Г., Бекхейт А. Х., Воскобойников С. П., Рожанский В. А., Костер Д., Боннин К., Шнейдер Р. // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 29. Вып. 5. С. 87.
7. Nave MFF, Rapp J., Bolzonella T., Dux R., Mantsinen M. J., Budny R., Dumortier P., von Hellermann M., Jachmich S., Koslovski H. R., Maddison G., Messiaen A., Monier-Garbet P., Ongena J., Puiatti M. E., Strachan J., Telesca G., Unterberg B., Valisa M., de Vries P. // Nucl. Fusion. 2003. Vol. 43. P. 1204.
8. Dux R., Giroud C., Zastrow K.-D. // Nucl. Fusion. 2004. Vol. 44. P. 260.
9. Тимченко Н. Н., Днестровский А. Ю., Кузнецова Л. К., Лисица В. С., Вестерхов Е. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 2008. Вып. 3. С. 80.
10. Burhen R., Feng Y., Ida K., Maassberg H., Makkartu K. J., Kalinina D., Kobayashi M., Morita S., Nakamura Y., Nozato H., Okamura S., Sudo S., Suzuki C., Tamura N. // Nucl. Fusion. 2009. Vol. 49. P. 1.
11. Блох М. А., Смирнова А. Д., Парамонов А. В., Ларионова Н. Ф., Колесников В. Н., Кладов С. В., Илюхин Б. И., Донская Н. П., Гиппиус Е. Ф., Воронов Г. С., Шнигель И. С. Препринт. АН СССР, Физ. ин-т им. П. Н. Лебедева. Физика и химия плазмы. № 39. 1986.
12. Андрюхина Э. Д., Агапов Л. Н., Батанов Г. М., Бережецкий М. С., Блох М. А., Богданов С. Д., Воронов Т. С., Гиппиус Е. Ф., Донская Н. П., Дябилин К. С., Ларионова Н. Ф., Литвак А. Г., Кладов С. В., Илюхин Б. И., Курбатов В. И., Коврижных Л. М., Колесников В. Н., Колик Л. В., Новикова А. В., Парамонов А. В., Попов С. Н., Сапожников А. В., Сарксян К. А., Сбитникова И. С., Смолякова О. Б., Смирнова А. Д., Суворов Е. В., Суходольский В. Н., Мецераков А. Е., Петров А. Е., Федянин О. И., Фрайман А. А., Хольнов Ю. В., Шнигель И. С. // Письма в ЖЭТФ. 1984. Т. 40. С. 377.
13. Блох М. А., Воронов Г. С., Гиппиус Е. Ф. и др. // Физика плазмы. 1988. Т. 14. Вып. 4. С. 421.
14. Abrakov V. V., Akulina D. K., Andryukhina E. D., Batanov G. M., Berezhetksij M. S., Danilkin I. S., Donskaya N. P., Fedyanin O. I., Gladkov G. A., Grebenschikov S. E., Harris J. H., Kharchev N. K., Kholnov Yu. V., Kolik L. V., Kovrizhnykh L. M., Larionova N. F., Letunov A. A., Likin K. M., Lyon J. F., Meshcheryakov A. I., Nechaev Yu. I., Petrov A. E., Sarksyann K. A., Sbitnikova I. S. // Nuclear Fusion. 1997. Vol. 37. P. 233.
15. von Goeler S., Stodiek W., Eubank H., et al. // Nuclear Fusion. 1975. Vol. 15. P. 301.

PACS: 52.50.-b

Dynamics of impurities accumulation in the L-2M stellarator plasma

I. Yu. Vafin and A. I. Meshcheryakov

Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences
38 Vavilov str., Moscow, 119991, Russia
E-mail: meshch@fpl.gpi.ru; ildar@fpl.gpi.ru

Received March 28, 2018

A new method for measuring the enhancement factor which is ratio of intensities of X-ray radiation of the stellarator plasma and the bremsstrahlung of pure hydrogen plasma is presented in this paper. The method is based on detection of soft X-ray emission intensity of the stellarator plasma. It makes it possible to estimate the amount of impurities accumulated in plasma during the facility shot. Semiconductor detectors were used for measuring and monitoring the enhancement factor during the facility shots. The values of the enhancement factor, obtained using the presented method, were compared to those obtained by traditional technique based on the spectral measurements. The results obtained using these two methods occurred to be in good agreement. Measurements of the enhancement factor were carried out in different ECRH operation modes of the L-2M stellarator.

Keywords: plasma physics, high-temperature plasma, stellarator, boronization, plasma impurities, effective charge of plasma, computer simulations, SXR spectrometry.

REFERENCES

1. V. I. Gervids and V. A. Krupin, JETP Letters **18** (2), 106 (1973).
2. R. A. Demirhanov, A. G. Kirov, L. F. Ruchko, and A. V. Sukachev, JETP Letters **37** (8), 381 (1983).
3. U. Samm, Fusion Science and Technology **47**, 73 (2005).
4. M. Z. Tokar², J. Rapp, G. Bertschinger, L. Konen, H. R. Koslovski, A. Kramer-Flacken, V. Philipps, U. Samm, and B. Unterberg, Nuclear Fusion **37** (12), 1691 (1997).
5. L. B. Ran, D. E. Roberts, H. R. Yang, G. Dobel, K. Gentle, Von Goeler, E. Holzhauser, K. Hubner, M. Keilhacker, A. Korotkov, T. C. Luce, Y. Miura, N. Tsois, and H. Wurtz, Journal of Nuclear Materials **162-164**, 14 (1989).
6. Y. G. Kaveeva, A. H. Bekheit, S. P. Voskoboynikov, V. A. Rojanskiy, D. Koster, K. Bonnin, and R. Schneider, Letters to the JTF **29** (5), 87 (2003).
7. MFF Nave, J. Rapp, T. Bolzonella, R. Dux, M. J. Mantsinen, R. Budny, P. Dumortier, M. von Hellermann, S. Jachmich, H. R. Koslovski, G. Maddison, A. Messiaen, P. Monier-Garbet, J. Ongena, M. E. Puiatti, J. Strachan, G. Telesca, B. Unterberg, M. Valisa, and P. de Vries, Nucl. Fusion **43**, 1204 (2003).
8. R. Dux, C. Giroud, K.-D. Zastrow, Nucl. Fusion **44**, 260 (2004).
9. N. N. Timchenko, A. Yu. Dnestrovskiy, L. K. Kuznetsova, V. A. Lisitsa, and Y. Vesterhof, *Issues of nuclear science and technology. Ser. Thermonuclear fusion. 2008, issue 3. P. 80–86.*
10. R. Burhen, Y. Feng, K. Ida, H. Maassberg, K. J. MakkCarthy, D. Kalinina, M. Kobayashi, S. Morita, Y. Nakamura, H. Nozato, S. Okamura, S. Sudo, C. Suzuki, and N. Tamura, Nucl. Fusion **49**, 1 (2009).
11. M. A. Bloch, A. D. Smirnov, A. V. Paramonov, et al. *Preprint on Physics and Chemistry of Plasma; No. 39* (Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, 1986).
12. D. E. Andruhina, L. N. Agapov, G. M. Batanov, et al., Letters to the JTF **40**, 377 (1984).
13. M. A. Bloch, G. S. Voronov, E. F. Gippius, and others, Plasma Physics Reports **14** (4), 421 (1988).
14. V. V. Abrakov, D. K. Akulina, E. D. Andryukhina, et al., Nuclear Fusion **37**, 233 (1997).
15. S. von Goeler, W. Stodiek, H. Eubank, H. Fishman, Grebenshchikov, and E. Hinnov, Nuclear Fusion **15**, 301 (1975).