

УДК 621.039.6

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМЕННЫМ ШНУРОМ ТОКАМАКА ЧЕРЕЗ ГАЗОНАПУСК

О.Н.Александрова, Н.В.Пашацкий

Озерский технологический институт МИФИ, г. Озерск Челябинской обл.



Изучены процессы взаимодействия молекулярного водорода, напускаемого через клапан в камеру токамака, с плазмой на стадии подъема тока. На основе энергетического подхода рассчитан критерий оптимального газонапуска.

ВВЕДЕНИЕ

Успехи, достигнутые в термоядерных исследованиях, поставили вопрос о разработке проектов энергетических термоядерных реакторов. Сейчас в США, на базе лабораторий сторон – участниц осуществляется разработка первой фазы реактора ИТЭР (BPP: Basic Performance Phase), целями которой являются демонстрация и исследование физики длительного горения плазмы.

Одной из инженерно-физических проблем эксплуатации ИТЭР является проблема автоматического регулирования и управления профилем тока плазменного шнура. Решение этой задачи может быть осуществлено напуском холодного рабочего газа через клапан. Одновременно это способствует подпитыванию плазмы дейтерий-тритиевым топливом. Попытки управления плазменным шнуром проводились на отечественных токамаках [1-4] путем эмпирического подбора начального давления в газоразрядной камере и расхода рабочего газа, напускаемого через клапан в процессе разряда.

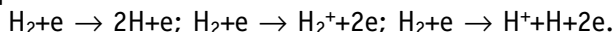
При подъеме тока в плазменном шнуре по мере разогрева плазмы развивается скин-эффект, препятствующий «проталкиванию» тока в центральные области плазменного шнура. Скинированный профиль тока неустойчив по отношению к винтовым возмущениям. Напуск холодного водорода через клапан охлаждает поверхностный слой плазменного шнура. Это приводит к сглаживанию скин-эффекта. Однако чрезмерный расход напускаемого газа способствует сильному сужению токового канала и развитию широкого спектра МГД-неустойчивостей, вызывающих срыв плазменного шнура.

Решение задачи идентификации плазменного шнура как объекта регулирования при газонапуске требует рассмотрения молекулярных процессов при взаимодействии нейтрального водорода и расчета энергобаланса поверхностного слоя плазменного шнура, задаваемого глубиной проникновения тока.

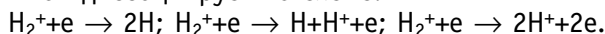
МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ НЕЙТРАЛЬНОГО ВОДОРОДА И ПЛАЗМЫ

Исследование процессов взаимодействия напускаемого молекулярного водорода с плазмой проводилось в рамках разработанной модели газонапуска [5]. Модель газонапуска включает в уравнения баланса энергии и частиц в токамаке [6, 7] процессы ионизации, диссоциации и возбуждения молекулярного водорода, взаимодействующего с плазмой.

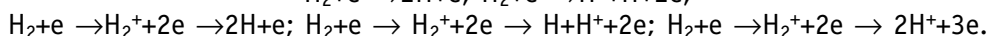
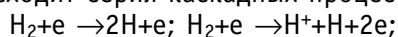
В результате электронного удара молекула водорода либо диссоциирует с образованием двух атомов водорода, либо ионизируется с образованием молекулярного иона [8, 9]:



Молекулярный ион диссоциирует по схеме:



Таким образом, происходит серия каскадных процессов:



Скорость ионизации S_0 в расчетах аппроксимировалась формулой [10, 11]:

$$S_0 = \frac{9.7 \cdot 10^{-14}}{x + 0.73} \cdot \left(\frac{x}{1+x} \right)^{0.5} \cdot \exp(x), \quad x = 13.6 \text{ эВ}/T_e, \quad (1)$$

где T_e - электронная температура.

Для скорости диссоциации S_d использовалась формула [10]:

$$S_d = \begin{cases} 1.4 \cdot 10^{-14} \sqrt{T_e} \exp(-x), & x > 1 \\ 5.2 \cdot 10^{-14} \sqrt{\frac{x}{1+x}} \exp(-x), & x < 1, \end{cases} \quad x = 15.6 \text{ эВ}/T_e. \quad (2)$$

В столкновениях электронов плазмы с молекулами водорода возбуждаются атомные уровни. В работе рассматривался процесс перехода в возбужденное состояние с $\epsilon = 10.2$ эВ. Для скорости указанного процесса взята формула [11]:

$$S_1 = \frac{5.2 \cdot 10^{-14}}{x_1 + 0.28} \cdot \sqrt{x_1(1+x_1)} \cdot \exp(-x_1), \quad x_1 = 10.2 \text{ эВ}/T_e. \quad (3)$$

Диффузия молекулярного водорода в плазму осуществлялась преимущественно в процессе резонансной перезарядки: $\text{H} + \text{H}^+ \rightarrow \text{H}^+ + \text{H}$. Коэффициент диффузии D_m рассчитывался согласно [10]:

$$D_m = \frac{T_i}{v_m m_m}, \quad v_m \approx 1.7 \cdot 10^{-8} \sqrt{T_i} n, \quad (4)$$

где m_m - масса молекулы водорода, n - плотность частиц плазмы, v_m - частота процесса резонансной перезарядки, T_i - ионная температура.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ НАПУСКАЕМОГО МОЛЕКУЛЯРНОГО ВОДОРОДА С ПЛАЗМОЙ

В уравнения баланса энергии в токамаке в модели газонапуска [5] были включены энергетические потери в процессах ионизации, диссоциации и возбуждения молекулярного водорода, потери на тормозное и циклотронное излучения. В модели исключены процессы перемешивания.

Энергетические потери в элементарных процессах ΔW описывались согласно [11]:

$$\Delta W = \Delta W_{\text{ion}} + \Delta W_{\text{dis}} + \Delta W_1 = 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot (13.6 \cdot S_0 + 15.6 \cdot S_d + 10.2 \cdot S_1) n n_m, \quad (5)$$

где ΔW_{ion} - энергетические потери при ионизации молекулярного водорода, ΔW_{dis} - при диссоциации молекулярного водорода, ΔW_1 - энергетические потери в процессе возбуждения атомного уровня с $\varepsilon = 10.2$ эВ.

Энергетические потери на тормозное излучение ΔW_{BR} рассчитывались согласно [6]:

$$\Delta W_{\text{BR}} = 2.2 \cdot 10^{-13} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1} \text{ эВ}^{1/2} n^2 T^{1/2}. \quad (6)$$

Энергетические потери на циклотронное излучение ΔW_{C} рассчитывались согласно [12]:

$$\Delta W_{\text{C}} = 0.417 \cdot \frac{n^{1/2} T_e^{5/2} B^{5/2}}{a^{1/2}} \sqrt{1 + \frac{a}{R} \frac{18.9}{T_e^{1/2}}}, \quad (7)$$

где B - индукция тороидального магнитного поля, a - малый радиус плазменного шнура, R - большой радиус плазменного шнура.

Напуск холодного водорода влияет на транспортные процессы по всему плазменному объему. Однако используя энергетический подход, на стадии подъема тока удастся выделить область, в которой система уравнений энергетического баланса решается аналитически.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследовалась начальная стадия разогрева плазменного шнура, имеющего размеры: $R=1.06$ м и $a=0.32$ м. Рассматривались следующие начальные параметры плазмы: $T_e (0 \leq r \leq a) = 10$ эВ, плотность частиц плазмы $n (0 \leq r \leq a) = 10^{18} \text{ м}^{-3}$, плотность молекулярного водорода $n_m (0 \leq r \leq a) = 10^{18} \text{ м}^{-3}$, где r - радиус магнитной поверхности. При подъеме тока $dI/dt = 4 \cdot 10^6 \text{ А/с}$ в установку напускался газ, вызывающий на границе плазменного шнура подъем плотности молекулярного водорода: $dn_m(r=a)/dt = 2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$. Согласно расчетам по модели [5], для $t = 0.01$ с электронная температура T_e в периферийной области плазменного шнура достигает 144 эВ. Глубина проникновения тока, соответствующая указанной температуре, уменьшается до $h=0.03$ м. Это приводит к мощному нагреву поверхностного h -слоя и развитию скин-эффекта. Мощность энерговклада омического нагрева в h -слой достигает $\Delta W_{\text{OH}} \approx 161 \text{ кВт/м}^3$. Однако потери на тормозное и циклотронное излучения в h -слое в этот момент невелики и составляют $\Delta W_{\text{BR}} + \Delta W_{\text{C}} \approx 0.4 \text{ Вт/м}^3$. Значительные энергетические потери по электронному каналу в h -слое осуществляются вследствие элементарных взаимодействий молекулярного водорода с плазмой. Мощность ионизационных потерь составит $\Delta W_{\text{ion}} \approx 68 \text{ кВт/м}^3$, мощность энергетических потерь в процессах диссоциации - $\Delta W_{\text{dis}} \approx 37.4 \text{ кВт/м}^3$, мощность энергетических потерь в процессах возбуждения атомного уровня с $\varepsilon = 10.2$ эВ в h -слое - $\Delta W_1 \approx 62 \text{ кВт/м}^3$. Из рассмотренных элементарных процессов с наибольшей частотой проходит процесс ионизации: $\nu_{\text{ion}} = 6.8 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$. Очевидно, что в первую очередь, сглаживанию профиля тока в h -слое и, соответственно, подавлению низких мод винтовых неустойчивостей, определяемых значением плотности тока на границе плазменного шнура и его радиальным градиентом, способствуют процессы ионизации, диссоциации и возбуждения атомных уровней.

Однако чрезмерный расход напускаемого газа будет не компенсировать, а подавлять омический нагрев в h -слое и вызывать сужение токового канала. На основе энергетического подхода была составлена оценка максимальной скорости ро-

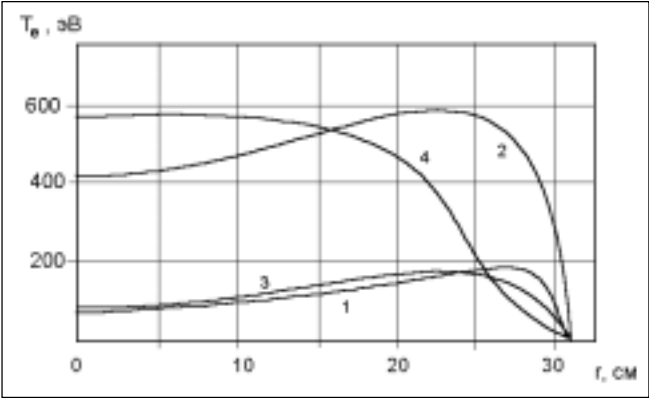


Рис. 1. Радиальное распределение электронной температуры $T_e(r)$ для двух режимов:
1, 2 - без газонапуска при $t=0.01$ и $t=0.1$ с;
3, 4 - с газонапуском при $t=0.01$ и $t=0.1$ с, $a=32$ см

при отсутствии газонапуска и с газонапуском. На рис.1 показаны профили электронной температуры $T_e(r)$ для $t_1=0.01$ с и $t_2=0.1$ с без газонапуска и с газонапуском. В случае с газонапуском $T_e(r)$ в пределах h-слоя не поднимается выше 200 эВ в отличие от режима без газонапуска, где температура электронов достигает в пределах h-слоя 400 эВ. Из рис.2 видно, что в случае газонапуска на стадии подъема тока степень скинирования профиля тока $\gamma=\max(j_{r>0})/j(0)$ снижается и происходит сдвиг максимума плотности тока $\max(j_{r>0})$ вглубь плазменного шнура.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчеты энергетических и молекулярных процессов в поверхностном слое плазменного шнура токамака по модели газонапуска и с использованием энергетического подхода позволяют сделать следующие выводы:

- процессы ионизации, диссоциации и возбуждения атомных уровней молекулярного водорода являются ответственными за значительное охлаждение электронной компоненты плазмы поверхностного слоя плазменного шнура в режиме газонапуска;

- рассчитан оптимальный критерий сглаживания скин-эффекта в поверхностном слое плазменного шнура: напуск газа через клапан не должен вызывать для $t>0.01$ с превышение значения скорости роста граничной плотности молекулярного водорода $P_{ист} = 2.17 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ и для $t>0.1$ с - $P_{ист} = 2.17 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ при $dI/dt = 4 \cdot 10^6 \text{ А/с}$.

ста граничной плотности молекул водорода $P_{ист} = d(n_m(r=a))/dt$, определяемой напуском газа, при заданном подъеме тока dI/dt . По мере прогрева h-слоя $P_{ист}$ не должно превышать $2.17 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ для $t > 0.01$ и $2.17 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ для $t > 0.1$ с.

На рис.1, 2 представлены результаты численного расчета профилей плотности тока и электронной температуры согласно модели [5] в двух режимах:

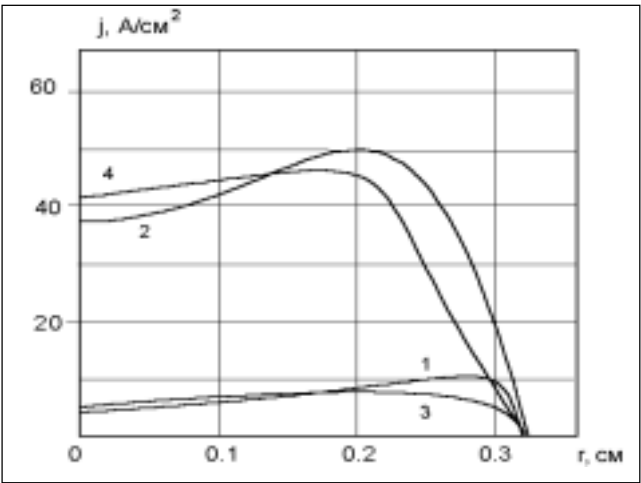


Рис. 2. Радиальное распределение плотности тока $j(r)$ для двух режимов:
1, 2 - без газонапуска при $t=0.01$ и $t=0.1$ с;
3, 4 - с газонапуском при $t=0.01$ и $t=0.1$ с

Список литературы

1. Ноткин Г.Е. О формировании профиля тока на установках токамак Т-10 // Физика плазмы. – 1985. – Т.11. – Вып.1.
2. Гуляев В.А., Коваленко В.Г., Левков Б.С., Ноткин Г.Е. Комплексная система автоматического регулирования параметрами плазмы с помощью газонапуска для установок токамак // Сб. науч. тр. ИАЭ им.И.В.Курчатова. – 1989. – Т.2.
3. Бендер С.Е., Косцов Ю.А., Литуновский Р.Н., Миняев О.А., Шаховец К.Г., Колчин А.Г., Носов С.Л., Овсянников Д.А. Исследование режимов управления газонапуском в токамаке «Туман-3» / Всесоюзная конференция по инженерным проблемам УТС: Тез. докл. – Ленинград, 1984.
4. Беляков В.А., Васильев В.И., Ивкин В.Г., Кавин А.А., Косцов Ю.А., Литуновский Р.Н., Миняев О.А., Мозин И.В., Теплов П.П. Система управления параметрами плазмы в токамаке-реакторе / Всесоюзная конференция по инженерным проблемам УТС. Тез. докл. – Ленинград, 1984.
5. Aleksandrova O.N., Pashatsky N.V. The transmutation function formation at automatic control systems of plasma density shaping at discharge with gas puffing / The third international conference on new energy systems and conversions. – Kazan, 1997.
6. Днестровский Ю.Д., Костомаров Д.П. Математическое моделирование плазмы. – М.: Наука, 1993.
7. Пистуневич В.И., Шаталов Г.Е. Термоядерный реактор на основе токамака // Итоги науки и техники. Физика плазмы. – 1981. – Т.2.
8. Крашенников С.И., Пожаров В.А. Гидродинамика нейтральной компоненты в диверторной плазме. – М.: ИАЭ им.И.В.Курчатова, 1985.
9. Елецкий А.В., Смирнов Б.М. Элементарные процессы в плазме. // Основы физики плазмы. – М.: Энергоиздат, 1983. – Т.1.
10. Вихрев В.В., Погуце О.П., Чудин Н.В., Юрченко Э.И. Процессы переноса в токамаке с адиабатическим сжатием. – М.: ИАЭ им.И.В.Курчатова, 1980.
11. Вайнштейн П.А. Возбуждение атомов и уширение спектральных линий. – М.: Наука, 1979.
12. Захаров Л.Е., Путвинский С.В. Основы оптимизации токамаков // Итоги науки и техники. Физика плазмы. – 1985. – Т.7. – С.4-79.

Поступила в редакцию 13.01.99.

УДК 519.688:621.039.58

Information Authenticity Control in Vibro-Diagnostics System of the Novovoronezh NPP \ A.O.Skomorokhov, M.T.Slepov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 10 pages, 3 tables, 6 illustrations. - References, 8 titles.

The paper is devoted to the questions of automation of spectrum spoilage check procedure for the vibration monitoring system installed at 3 and 4 units of the Novovoronezh NPP. The indications are described which allow to divide the original set of spectra into the "normal" and "abnormal" classes. The selection of the most informative spectrum indications is demonstrated. The diagnostics of specified faultiness is made based on the criteria developed by the authors.

УДК 541.15+543.51

Main Objectives of the Ecological Estimation of Properties of Secondary Substances Formed after Contaminated Food Irradiation \ T.V. Melnikova, L.P. Polyakova, G.V. Kozmin; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 9 pages, 5 tables, 1 illustration. - References, 11 titles.

The problem of secondary contamination of irradiated food by organochlorinated pesticides (OCP) residues that degraded upon treatment with ionizing radiation is discussed in this article. The absence of systematic concept in the solution of the problem at the reviewed publications is demonstrated. On the base of performed OCP monitoring the concentration ranges of the OCP are determined at that types of food which can be exposed to radiation treatment. Irradiation of model objects is carried out and the estimation of OCP degradation is given. The methods investigating of new chemical compounds that are formed after the irradiation of OCP containing objects are proposed.

УДК 621.039.6

The Energetic Approach to Solve the Problem of Tokamak Plasma Control with Gas Puffing \ O.N. Alexandrova, N.V. Pashatsky; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 5 pages, 2 illustrations. - References, 12 titles.

The interaction processes between the molecular hydrogen being injected into tokamak's camera and plasma were studied at the current increase stage. Using energetic approach the criterion of optimum gas puffing was calculated.

УДК 621.039.526:621.039.534.6

Lead Coolant for Fast Reactor-Burner with Hard Neutron Spectrum \ G.L. Khorasanov, A.P. Ivanov, V.V. Korobeinikov, A.I. Blokhin, A.L. Shimkevich; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 5 pages, 5 tables, 4 illustrations. - References, 4 titles.

The possibility of increasing minor actinides (MA) burn out efficiency due to their fission in a fast reactor with lead isotope, Pb-208, as a coolant is considered. Calculation of MA fission and capture rate in a fast reactor blanket with different coolants: sodium, lead natural, and lead isotope, Pb-208, is given. It is shown that the use of Pb-208 in the fast reactor results in increase by 20-30 percent of MA incineration in comparison with a conventional fast reactor. The induced radioactivity of sodium, bismuth, lead, and its stable isotopes is analyzed.

УДК 539.17.013

Simulation of Periodic Structures in Distribution of Defects, Generated in NPP Structures Materials by the Stationary Source \ I.R.Bagdasarova, V.A.Galkin; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 9 pages. - References, 14 titles.