

## Список литературы

1. Туник Ю.В. Численное моделирование детонационного горения водородовоздушных смесей в сопле Лаваля// Изв. РАН. МЖГ. 2010. № 2. С. 107-114.
2. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. - М.: Наука, 1976. - 400с.
3. Тилляева Н.И. Обобщение модифицированной схемы С.К. Годунова на произвольные нерегулярные сетки// Ученые записки ЦАГИ. 1986. Т. XVII. № 2. С. 18-26.
4. Азатян В.В., Андрианова З.С., Иванова А.Н. Моделирование ингибирования распространения пламени в водородовоздушной среде// Кинетика и катализ. 2010. Т. 51. № 4. С. 483-491.
5. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ/ Пер. с англ. Г.Л. Агафонова. Под ред. П.А. Власова. — М.: Физматлит, 2003. - 352 с.
6. Starik A.M., Titova N.S., Sharipov A.S.. Kinetic mechanism of H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> ignition promoted by singlet oxygen O<sub>2</sub>(a<sup>1</sup>Δg) // Deflagrative and detonative combustion / Ed. by G. D. Roy, S. M. Frolov. — Torus Press. Moscow, 2010. Pp. 12-19.

## НАРУШЕНИЕ ИОНИЗАЦИОННОГО РАВНОВЕСИЯ У ПОВЕРХНОСТИ КОНДЕНСИРОВАННОЙ ЧАСТИЦЫ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ

И.И. Файрушин, КФУ, Казань, fairushin\_ilmaz@mail.ru

Г.Ю. Даутов, КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, Казань, dautow.ildar2014@yandex.ru

Н.Ф. Кашапов, КФУ, Казань, kashnail@gmail.com

Систему, состоящую из частично ионизованного газа и частиц конденсированного вещества микронных размеров, принято называть пылевой плазмой или плазмой с конденсированной дисперсной фазой (КДФ) [1]. Температура компонент такой системы может быть одинакова, что реализуется в ряде случаев при атмосферном или более высоком давлениях [2]. Далее рассмотрим именно такой случай, когда реализуется термодинамическое или статистическое равновесие.

Содержание в плазме пылевых частиц, обуславливает применение к описанию их структур модели из физики и химии конденсированного состояния. Одной из моделей является так называемая модель «желе» [3,4]. В модели «желе» ионный остов частицы представляется в виде непрерывного однородного положительного фона, а электроны проводимости как электронный газ внутри этого положительного фона. Модель «желе» широко применяется для описания электронных свойств металлов и полупроводников, а также их кластеров и малых частиц [3,4].

В работе рассматриваются частицы из веществ, представляющих собой полупроводники тогда, плотность положительного фона, определяется концентрацией атомов, электроны которых способны свободно перемещаться внутри частицы. Электронный газ в полупроводниках имеет концентрацию ниже порога вырождения, поэтому к нему можно применить статистику Больцмана

$$n_e = n_{e0} e^{\frac{q\varphi}{kT}}, \quad (1)$$

где  $n_e$  – концентрация электронов (электронная плотность),  $q$  – абсолютное значение заряда электрона,  $\varphi$  – потенциала электрического поля,  $n_{e0}$  – электронная плотность при  $\varphi=0$ ,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютное значение равновесной температуры всех компонент системы, которая в данной работе принята равной 2500 К. В качестве значений плотности положительного фона частицы и относительной диэлектрической проницаемости материала частицы в расчетах взяты соответственно значения  $n_i^{(1)}=10^{21} \text{ м}^{-3}$  и  $\varepsilon=10$ .

Когда окружающий пылевые частицы газ не содержит легкоионизирующиеся примеси, ионизацией самого газа при рассматриваемой температуре можно пренебрегать [5]. В данной же работе примем, что в газе находится примесь легкоионизирующегося щелочного металла. Для определения концентрации заряженных компонент в окружающем пылевые частицы плазмы воспользуемся известным уравнением Саха

$$\frac{n_i^{(2)} n_e}{n_a} = \frac{2z_i}{z_a} \left( \frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot e^{-\frac{q\varphi_u}{kT}}, \quad (2)$$

где  $n_i^{(2)}$ ,  $n_a$  – концентрация ионов и атомов примеси соответственно,  $n_e$  – концентрация электронов (электронная плотность),  $z_i$ ,  $z_a$  – статистические суммы соответственно ионов и атомов примеси (в расчетах далее используются значения соответствующие элементу калию),  $m_e$  – масса электрона,  $h$  – постоянная Планка,  $\varphi_u$  – потенциал ионизации примесного атома.

Т.к. при заданной температуре частицы будут эмитировать в окружающий их плазму электроны, они приобретут некоторый положительный заряд. Таким образом, вокруг пылевой частицы образуется электрическое поле, которое будет влиять на пространственное распределение концентраций электронов и ионов. Для простоты будем считать, что частицы имеют форму шара одного радиуса  $R$  и равномерно распределены в пространстве с расстоянием между центрами  $2l$ . Как известно связь потенциала электрического поля и концентрации электрических зарядов задается уравнением Пуассона. В представленном случае, когда электронный газ во всем объеме пылевой плазмы невырожден, данное уравнение будет уравнением Пуассона-Больцмана. Рассматриваемая задача является сферически симметричной, поэтому это уравнение принимает следующий вид:

$$\frac{d^2\varphi}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d\varphi}{dr} = \frac{q}{\varepsilon_0} \left( \frac{n_{e0} e^{\frac{q\varphi}{kT}}}{\varepsilon \cdot \theta(R-r)} - \frac{n_i^{(1)}}{\varepsilon} \cdot \theta(R-r) - n_{i0}^{(2)} e^{-\frac{q\varphi}{kT}} \cdot \theta(r-R) \right), \quad (3)$$

где  $r$  – расстояние отсчитываемое от центра частицы,  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная,  $\theta(r)$  – функция Хевисайда,  $n_{i0}^{(2)}$  – электронная плотность и концентрация ионов примеси при  $\varphi=0$ . За начало отчета потенциала примем поверхность частицы, т.е.  $\varphi(R)=0$ . Т.к. задача симметрична относительно центра частицы, то  $\varphi'(0)=0$ . К задаче необходимо применить еще и условие равенство нулю суммарного заряда в объеме, приходящейся на одну частицу, т.е.  $\varphi'(l)=0$ . В случае  $q\varphi \ll kT$  экспоненциальные множители в правой части уравнения (3) можно разложить в ряд и ограничиться первыми двумя членами, тогда данное уравнение решается аналитически. Далее будут рассмотрены только те решения, которые достаточно хорошо удовлетворяют данному условию. Зная распределение потенциала с использованием соотношения (1) нетрудно определить распределения электронной плотности и концентрации ионов примеси. На рис. 1 приведен график распределения концентраций электронов и ионов области  $0 \leq r \leq l$ , полученные решением уравнения (3).

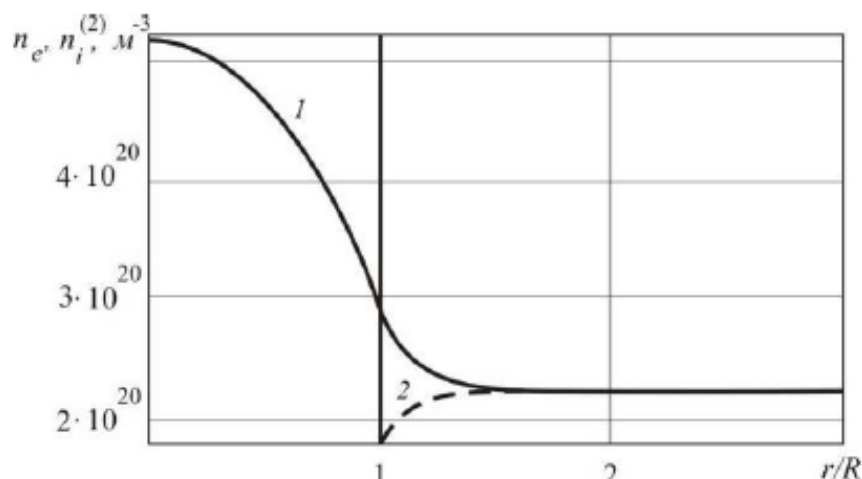


Рис. 1 – Распределения электронной плотности (кривая 1) и концентрации ионов примеси (кривая 2) при начальном значении концентрации примесных атомов равном  $10^{23} \text{ м}^{-3}$  и  $R=10^{-6} \text{ м}$

Как видно из рис. 1, больше электронов располагается ближе к частице, т.к. она заряжена положительно, а концентрация ионов растет с удалением от частицы. У поверхности частицы ионизационное равновесие нарушается. На больших расстояниях от частицы концентрации ионов и электронов выравниваются, плазма здесь уже квазинейтральная.

#### Список литературы

1. Фортов В.Е., Храпак А.Г., Якубов И.Т. Физика неидеальной плазмы: учебное пособие. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 528 с.
2. V.I. Vishnyakov. Phys. Rev. E 85, 026402 (2012).
3. В.К. Иванов, А.Н. Ипатов, В.А. Харченко Оптимизированная модель «желе» для металлических кластеров с экранированным кулоновским взаимодействием. ЖЭТФ, 1996, том 109, вып. 3, стр. 902-915.
4. М.Б. Смирнов, В.П. Крайнов. Многократная ионизация томас-фермиевского кластера сильным электромагнитным полем. ЖЭТФ, 1999, том 115, вып. 6, стр. 2014-2019
5. G Dautov, I Fayrushin, I Dautov, and N Kashapov / Journal of Physics: Conference Series 479 (2013)012014

## РАСЧЕТ УРОВНЯ ЭМИССИИ ОКСИДОВ АЗОТА ПРИ ПОДАЧЕ ПАРА С ПРИРОДНЫМ ГАЗОМ В КАМЕРУ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИНОЙ УСТАНОВКИ

Е.А. Филимонова, ОИВТ РАН, Москва, helfil@mail.ru

Влияние впрыска пара в камеру сгорания газотурбинной установки (ГТУ) на снижение образования оксидов азота исследовались экспериментально на протяжении уже нескольких десятков лет. В ряде работ, например, [1] было показано, что концентрация NO зависит от разбавителя ( $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  и др.), и что водяной пар играет не только роль «инертного» газа (как  $\text{N}_2$ ), но и оказывает химическое воздействие на процесс горения. В богатых топливно-воздушных смесях водяной пар приводит к снижению образования «быстрых» оксидов азота (prompt NO) за счет убыли СН в