**ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ЗОНДА В ПЛАЗМЕ, ОБРАЗОВАННОЙ ПРОДУКТАМИ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ**

Кунаков С.К., Кудабаева А.Д., Шапиева А.Е.

Международный Университет Информационных Технологий

Республика Казахстан, Алма-Ата

sandybeck.kunakov@gmail.com

В настоящей работе изложена теория сферического зонда в химически активной слабоионизированной плазме, содержащей отрицательные ионы. Рассмотрен случай интенсивной ионизации когда параметр, равный отношению ионизационной длины к радиусу зонда, является малым. Предполагается, что дебаевский радиус мал по сравнению с радиусом зонда,длина энергетической релаксации электронов много меньше локального макроскопического масштаба и функция распределения электронов определяется локальными значениями ne и Te.

1. **Основные уравнения**

Плазма, образованная продуктами ядерных реакций представлена плазмой газовой смеси, 3He+UF6 ,находящейся в нейтронном потоке. Продукты ядерной реакции 3He+n p+T+0.76 Mev вызывают образование положительных и отрицательных ионов и их последующую рекомбинацию по следующим каналам:

 (1)

 (2)

 (3)

 (4)

- (5)

 (6)

 (7)

 (8)

Скорость ионизации определяется количеством тепловых нейтронов и ценой образования пары ион-электрон Ω и равна:

$S=\frac{n (^{3}He)\*Φ\*σ\_{f}\*E\_{0}}{Ω}$ (9)

где $(^{3}He)$ - концентрация нейтральных атомов гелия, $Φ$ - величина нейтронного потока, $σ\_{f}$ - сечение реакции (1), $E\_{0}$ - кинетическая энергия продуктов реакции (1), $Ω$ - цена образования пары ион-электрон в газовой смеси 3He+UF6.

С учетом этих элементарных процессов (1-8) основные уравнения в гидродинамическом приближении для неподвижной плазмы имеют вид:

$\frac{d}{dr}\left(-D^{+}\frac{dn^{+}}{dr}+b^{+}n^{+}\frac{dφ}{dr}\right)=S-a\_{e}n^{+}n^{e}-a\_{i}n^{+}n^{-}$ (10)

$\frac{d}{dr}\left(-D^{-}\frac{dn^{-}}{dr}-b^{-}n^{-}\frac{dφ}{dr}\right)=βn^{e}-a\_{i}n^{+}n^{-}$ (11)

$\frac{d}{dr}\left(-D^{e}\frac{dn^{e}}{dr}-b^{e}n^{e}\frac{dφ}{dr}\right)=S-a\_{e}n^{+}n^{e}-βn^{e}$ (12)

$\frac{d^{2}φ}{dr^{2}}=n^{+}-n^{-}-n^{e}$ (13)

где $n^{+},n^{-}, n^{e}$ - концентрации положительных, отрицательных ионов и электронов, $D^{+},D^{-},D^{e},b^{+},b^{-},b^{e}$ - коэффициенты диффузии и подвижности положительных, отрицательных ионов и электронов, $ β$ - константа прилипания [2], определяющая формирование отрицательных ионов (5).

Рекомбинация атомарных ионов гелия равна:

$α=2\*10^{-27}n^{e} cm^{3}/s$ (14)

Рекомбинация молекулярных ионов гелия равна [3]:

$α\_{i}=10^{-\left(26\pm 1\right)}(\frac{T\_{e}}{300})^{\frac{3}{2}} cm^{6}/s$ (15)

Граничные условия на поверхности зонда определяются следующими условиями:

$n^{+ }\left(r\_{p}\right)=n^{-}\left(r\_{p}\right)=n^{e}\left(r\_{p}\right)=0, φ\left(r\_{p}\right)=φ\_{p}$ (16)

$n^{+ }\left(r\_{0}\right)=n^{+0}, n^{-}\left(r\_{0}\right)=n^{-0},n^{e}\left(r\_{0}\right)=n^{e0}0, φ\left(r\_{0}\right)=0$ (17)

где $r\_{p}$ - радиус зонда, $r\_{0}$ - радиус слоя объемного заряда.

В невозмущенной области $\left(r\geq r\_{0}\right)n^{-0}=\left(1-δ\right)n^{+0}, n^{e}=δn^{+0}$, а $δ$ и $n^{+0}$ определяются следующими уравнениями:

$(n^{+0})^{3}+\frac{β}{α\_{e}}(n^{+0})^{2}-\frac{S}{α\_{e}}n^{+0}-\frac{βS}{α\_{e}α\_{i}}=0$ (18)

$δ=\frac{α\_{i}n^{+0}}{β+α\_{i}n^{+0}}$ (19)

Во всех точках от зонда до противозонда выполняется соотношение:

$J^{+}-J^{-}-J^{e}=0$ (20)

$J\_{p}=eJ^{+}+eJ^{-}+eJ^{e}$ (21)

Тогда напряженность электрического поля равна:

$\frac{dφ}{dx}=-(\frac{D^{+}-\left(1-δ\right)D^{-}-δD^{e}}{b^{+}+\left(1-δ\right)b^{-}+δb^{e}})\frac{dln(n^{+})}{dx}$ (22)

При этом диффузионные потоки могут быть представлены в следующем виде:

$J^{+}=-D\_{a}^{+}\frac{dn^{+}}{dx}$ (23)

$J^{-}=-D\_{a}^{-}\frac{dn^{-}}{dx}$ (24)

$J^{e}=-D\_{a}^{e}\frac{dn^{e}}{dx}$ (25)

где $D\_{a}^{+},D\_{a}^{-},D\_{a}^{e}$ - коэффициенты амбиполярной диффузии заряженных компонентов:

$D\_{a}^{+}=\frac{δ\left(D^{+}b^{e}+D^{e}b^{+}\right)+\left(1-δ\right)(D^{+}b^{-}+D^{-}b^{+})}{b^{+}+\left(1-δ\right)b^{-}+δb^{e}}$ (26)

$D\_{a}^{-}=\frac{\left(D^{+}b^{-}+D^{-}b^{+}\right)+δ(D^{+}b^{e}+D^{e}b^{+})}{b^{+}+\left(1-δ\right)b^{-}+δb^{e}}$ (27)

$D\_{a}^{e}=\frac{\left(D^{+}b^{e}+D^{e}b^{+}\right)}{b^{+}+\left(1-δ\right)b^{-}+δb^{e}}$ (28)

Вольтамперная характеристка зонда может быть получена в любом сечении, как в области объемного заряда, так и в диффузионной области, разница состоит в том, что в слое объемного заряда ток формируется за счет переноса вследствие действия электрического поля на заряженные частицы, в то время как в диффузионной области диффузионный поток уравновешивает процессы ионизации, которые в свою очередь не в полной мере компенсируются рекомбинационными процессами, как это есть в области невозмущенной плазмы. Более того рекомбинационные процессы и процессы образования отрицательных ионов по мере приближения к зонду уменьшаются вследствие падения концентрации электронов в случае отрицательного потенциала зонда и разогрева электронов в случае положительного потенциала зонда.

В нормализованном виде уравнения (10-13) и граничные условия (16-17) имеют следующий вид:

$ω\frac{d}{dξ}\left(-\frac{dN^{+}}{dξ}+\frac{χ}{τ}N^{+}\frac{dψ}{dξ}\right)=1-α\_{i}N^{+}N^{-}-α\_{e}N^{+}N^{e}$(29)

$ω\frac{d}{dξ}\left(-\frac{dN^{-}}{dξ}+\frac{χ}{τ}N^{-}\frac{dψ}{dξ}\right)=β\_{e}N^{e}-α\_{i}N^{+}N^{-}$ (30)

$\frac{d}{dξ}\left(-\frac{dN^{e}}{dξ}+χN^{e}\frac{dψ}{dξ}\right)=1-β\_{e}N^{e}-α\_{e}N^{+}N^{e}$ (31)

$χε\frac{d^{2}ψ}{dξ}=N^{+}-N^{-}-N^{e}$ (32)

Граничные условия соответственно преобразуются к следующему виду:

$N^{+}\left(1\right)=0,N^{-}\left(1\right)=0,N^{e}\left(1\right)=0,ψ\left(1\right)=1$ (33)

$N^{+}\left(ξ\_{0}\right)=1,N^{-}\left(ξ\_{0}\right)=1-δ,N^{e}\left(ξ\_{0}\right)=δ,ψ\left(ξ\_{0}\right)=0$ (34)

В уравнениях (29-32) были использованы следующие обозначения:

$$ω=\frac{D^{+}n^{+0}}{Sr\_{p}^{2}}, ε=(\frac{r\_{d}}{r\_{p}})^{2}, β\_{e}=\frac{βn^{+0}}{S}, a\_{e}=\frac{α\_{e}\left(n^{+0}\right)^{2}}{S},a\_{i}=\frac{α\_{i}\left(n^{+0}\right)^{2}}{S}, ξ=\frac{r}{r\_{p}}, ψ=\frac{φ}{φ\_{p}} ,$$

$$N^{+}=\frac{n^{+}}{n^{+0}}, N^{-}=\frac{n^{-}}{n^{+0}}, N^{e}=\frac{n^{e}}{n^{+0}}, r\_{d}=\frac{KT\_{e}}{4πe^{2}n^{+0}}, τ=\frac{T}{T\_{e}}, n^{+0}=n\_{\infty }^{+}, χ=\frac{φ\_{p}}{\frac{KT\_{e}}{e}}$$

1. **Слой объемного заряда**

В случае отрицательных потенциалов зонда система уравнений (29-32) преобразуется к следующему виду:

$\frac{d}{dξ}\left(τN^{+}\frac{dψ}{dξ}\right)=1$ (35)

$ε\frac{d}{dξ}\frac{dψ}{dξ}=N^{+}$ (36)

Система (35-36) может быть приведена к дифференциальному уравнению относительно $ψ(ξ)$:

$\frac{d}{dξ}\left(ψ^{''}ψ^{'}\right)=\frac{τ}{ωχ^{2}ε}$ (37)

Величина электрического поля в слое $r\_{p}\rightarrow r\_{0}$ равна:

$ψ^{'}=ψ^{'}\_{0}\sqrt{1+\frac{1}{2θ\left(ψ^{'}\_{0}\right)^{2}}(ξ-ξ\_{0})^{2}}$ (38)

где $θ=\frac{εωχ^{2}}{τ}$.

1. **Диффузионный слой**

В диффузионном слое для отрицательного потенциала зонда концентрация положительных ионов определяется следующим уравнением:

$ω\frac{d^{2}N^{+}}{dξ^{2}}=1-a(N^{+})^{2}$ (39)

где $ω=\frac{D^{+}n^{+0}}{Sr\_{p}^{2}}, a=\frac{α\_{e}δ\left(n^{+0}\right)^{2}+α\_{i}(1-δ)\left(n^{+0}\right)^{2}}{S}$

Определяя величину градиента концентрации на границе слой объемного заряда -диффузионный слой можно определить зондовый ток на зонд:

$I\_{p}=4πe\left(1+\frac{b^{+}}{b^{-}+b^{e}}\right)D\_{a}^{+}n^{+0}r\_{0}^{2}\frac{1}{r\_{p}}\left\{\frac{2}{ω}(1-\frac{a}{3}-N\_{0}+\frac{aN\_{0}^{3}}{3})\right\}^{\frac{1}{2}}$ (40)

Здесь как и в работе [4]

$N\_{0}=(\frac{Λ}{\frac{KT\_{e}}{e}})^{\frac{1}{3}}(\frac{r\_{d}}{r\_{p}})^{\frac{2}{3}}$ (41)

а величина слоя объемного заряда равна:

$r\_{0}=\frac{3D\_{a}^{+}n^{+0}N\_{0}}{Sr\_{p}}\frac{2}{ω}\left\{\frac{2}{ω}(1-\frac{a}{3}-N\_{0}+\frac{aN\_{0}^{3}}{3})\right\}^{\frac{1}{2}}$ (42)

$Λ=\frac{D^{+}-\left(1-δ\right)D^{-}-δD^{e}}{b^{+}+\left(1-δ\right)b^{-}+δb^{e}}$ (43)

**Литература:**

1. S.K.Kunakov and E.E.Son Probe Diagnostics of Nuclear-Excited Plasma of Uranium Hexafluoride, High Temperature, 2010, Vol.48, No.6, pp.789-805, Pleades Publishing, Ltd, 2010

2. R.N.Compton On the formation of positive and negative ions in gaseous UF\_{6}.The Journal of Chemical Physics,Vol.66, No.10, 15 May 1977, pp. 4478-4485.

3. H.A.Hassan and Jerry E.Deese Electron distribution function in a plasma generated by fission fragments, The Physics of Fluids, Vol.19.,No.12, December 1976,pp.2005-2010.

4. К.Н.Ульянов Теория электрических зондов в плотной плазме, ЖТФ, Том XL, №4, стр 790-798.