**ОБ ОТРЫВЕ ЭЛЕКТРОННОЙ И АТОМНО-ИОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ИНДУКЦИОННОМ РАЗРЯДЕ**

А. В. Герасимов, А. П. Кирпичников

*Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия, 420015 г. Казань, Карла Маркса, 68, e-mail: gerasimov@kstu.ru*

В [1] был изучен баланс энергии плазмы ВЧИ-разряда атмосферного давления в приосевой области плазменного сгустка с учетом выноса энергии из этой зоны излучением. При этом был предложен относительно простой метод расчёта двухмерного поля температур равновесной ВЧИ плазмы в канале индукционного ВЧ-плазмотрона, обобщающий известное решение Эккерта [2, 3] для центральной области плазмоида.

Между тем, известно, что даже при атмосферном давлении в ВЧИ разряде существует значительный отрыв электронной температуры от температуры атомно-ионного газа, разность которых на практике, особенно в области скин-слоя, может достигать величины нескольких тысяч градусов [4, 5].

Вопрос об особенностях энергообмена между электронным и атомно-ионным газом в данном случае имеет как чисто научный, так и значительный самостоятельный интерес в связи с задачей повышения эффективности работы различного рода плазменных устройств, использующих принцип ВЧИ нагрева газообразных сред.

В тех случаях, когда электронную и газовую температуры в разряде уже нельзя считать друг другу равными, необходимо рассматривать такую модель теплообмена в ВЧИ разряде, которая учитывает обмен энергией между электронным газом и атомно-ионным газом тяжелых частиц.

Ясно, что в этом случае рассмотренное в [1] уравнение энергии с учетом теплообмена излучением расщепляется на систему двух уравнений

; (1)

. (2)

Здесь *Te* и *Tai* – соответственно температуры электронного газа и атомно-ионного газа тяжелых частиц; *λe* и *λai* –коэффициенты теплопроводности электронного и атомно-ионного газов; *k* – постоянная Больцмана; *δ* – доля энергии, теряемой электронами при соударении с тяжелыми частицами; ν – частота этих столкновений; *ne* – концентрация электронов в разряде. При этом коэффициенты теплопроводности *λai* и *λe,*, а также *ne, δ* и *ν* в приосевой области плазмоида считаются приближенно постоянными по соображениям, высказанным выше. С точки зрения математики такая процедура означает принятие линейного приближения для уравнений (1), (2).

Уравнение (1) выражает баланс энергии для электронного газа, уравнение (2) ‑ баланс энергии для атомов и ионов. Слагаемое  при этом соответствует доле энергии, передаваемой электронным газом при соударениях тяжёлым частицам.

Балансовое соотношение в данном случае, очевидно, перейдёт в зависимость



и тогда уравнение (1) преобразуется к виду

,

откуда аналогично имеем

, (3)

где . В этом случае уравнение переноса тепла для атомно-ионного газа в свою очередь принимает вид



или

, (4)

где  ‑ параметр, отвечающий за перекачку энергии от электронов к тяжёлым частицам, с точки зрения математики ‑ параметр расщепления уравнения энергии по физическим процессам.

Общее решение однородного уравнения

,

соответствующего неоднородному уравнению, в данном случае, очевидно, имеет вид..

Найдём частное решения неоднородного уравнения



для некоторой неизвестной функции . Будем действовать аналогично [6 ].

Имея ввиду , в итоге имеем



. (5)

В том случае, когда параметр перекачки энергии , имеем , в этом случае передачи энергии от электронов тяжёлым частицам не происходит, и атомно-ионный газ остаётся холодным. При малых значений параметра 

. (6)

Заметим, что соотношение (6) можно записать несколько по-другому:



. (7)

В реальных условиях ВЧИ разряда справедливо неравенство , следовательно, оба выражения в квадратных скобках в формуле (7) больше нуля. Отсюда сразу же следует принципиальный и один из важнейших в теории двухтемпературного ВЧИ разряда результат, заключающийся в том, что температура атомно-ионного газа тяжёлых частиц и электронная температура в разряде ведут себя в нём по-разному. Профиль температуры газа тяжёлых частиц при этом имеет падающий по направлению радиальной оси характер на всём протяжении сечения плазменного сгустка, уменьшаясь к его периферийным областям, в то время как температура электронного газа возрастает с ростом *r* вблизи оси плазмоида.

В целом полученная в настоящей работе система формул достаточно точно описывает распределение температурных полей неравновесной плазмы вблизи оси плазменного сгустка и может быть полезна при решении достаточно широкого круга задач теплообмена в области физики и техники ВЧ низкотемпературной плазмы.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Герасимов А. В., Кирпичников А. П. О структуре поля температур высокочастотного индукционного разряда атмосферного давления вблизи оси плазменного сгустка//ТВТ. 1998. Т. 36. № 2. С. 342.
2. Eckert H. U. Analysis of thermal induction plasmas dominated by radial conduction losses //J. Appl. Phys. 1970. V. 41. No 4. P. 1520.
3. Eckert H. U. Analytical treatment of radiation and conduction losses in thermal induction plasmas //J. Appl. Phys. 1970. V. 41. No 4. P. 1529.
4. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. М.:Наука.-1987.
5. Дресвин С. В., Бобров А. А., Лелёвкин В. М. и др. Низкотемпературная плазма. Т. 6. ВЧ- и СВЧ-плазмотроны. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние.-1991.
6. Герасимов А. В., Кирпичников А. П. Двухтемпературная модель баланса энергии плазмы высокочастотного индукционного разряда вблизи оси плазменного сгустка//ТВТ. 2000. Т. 38. № 5. С. 710.