

ПЛАЗМЕННЫЕ ЭФФЕКТЫ ВОКРУГ ВЗРЫВАЮЩЕГОСЯ ПРОВОДНИКА С ТОКОМ

Недоспасов А.В., Ненова Н.В.*

ИБТ РАН, Москва

**nedospasov@ihed.ras.ru*

В экспериментах по взрыву тонких проводников электрическим током энергия втекает в проводник из окружающего пространства. Плотность этого потока на поверхности проводника для условий, обсуждаемых в [1] достигает 10^9 Вт/см², а для работы [2] — 10^8 Вт/см². Этот поток энергии проходит сквозь слой окружающего проводника пара. В докладе обсуждаются некоторые вопросы взаимодействия потока электромагнитной энергии с паром.

Электрический взрыв проволочек — существенно нестационарный процесс, требующий серьезного численного моделирования. Для простоты мы используем в оценках квазистационарные E и H поля, близкие к их максимальным значениям, которые, например, в [2] достигаются через 3–5 мкс. Для случая [1] продольное электрическое поле $E \approx 2 \cdot 10^4$ В/см, азимутальное магнитное поле на поверхности проводника $H \approx 8$ Тл. Для случая [2] $E \approx 1.5 \cdot 10^3$ В/см, $H \approx 14$ Тл. При таких полях неизбежна частичная ионизация пара, что может приводить к существенным изменениям его термодинамических характеристик, принимаемых в литературе. Ионизация производится электронными ударами и термоэмиссией ионов и электронов из нагретого проводника. Для простоты пренебрежено неоднородностью поля. Спад поля с расстояния увеличивает потоки ионов и электронов на проводник из-за притяжения параллельных токов. Давление пара стартует с очень низких значений и достигает к концу процесса многих атмосфер. В зависимости от давления влияние ионизации проявляется по-разному.

Если отношения циклотронных частот ионов и электронов к частоте их соударений много больше единицы, то частицы дрейфуют на поверхность проводника в скрещенных E , H полях. При этом для случая [2] ионы вольфрама приобретают в электрическом поле энергию порядка 100 эВ и приносят ее со скоростью порядка 10^6 см/с. Электроны получают энергию порядка $\exp(E\rho_e)$, где ρ_e — циклотронный радиус, то есть на много порядков меньше. В тех случаях, когда ион приносит энергию больше, чем энергия испарения атома, возможно явление тепловой контракции. Тепловая контракция наблюдается, когда поток энергии на поверхность зависит от ее температуры, при чем тепловой поток из плазмы тем больше, чем больше нагрет участок поверхности. При этом теплоотвод от нее не стабилизирует эту положительную обратную связь. Частота ионизации растет с ростом концентраций пара и электронов. По-видимому, существует температурный интервал в котором концентрация пара сильно понижена по сравнению с расчетной величиной.

При высоких, обсуждаемых в [1, 2], давлениях плазма не замагничена, и движение в ней заряженных частиц определяется обычной подвижностью. В докладе рассматриваются условия отклонения от ионизационного равновесия для изотермического случая, постулированного в [1, 2]. Одной из причин такого отклонения является разогрев электронного газа электрическим полем, и температура электронов оказывается больше температуры газа. При этом возможна дополнительная ионизация пара в кнудсеновском слое. Возвращающиеся на поверхность ионы приносят на нее, наряду с тепловой, энергию рекомбинации, что так же создает условия для тепловой контракции.

Сделанные оценки показывают, что дополнительная энергия приносимая частицами, может составлять заметную часть потока электромагнитной энергии внутрь проводника. В литературе рассматривалась тепловая контракция при испарении поверхностей, нагреваемых извне (см., например, [3, 4]). Роль неравномерного теплообмена на поверхности проводника, нагреваемого джоулевым теплом, требует специального рассмотрения. При обсуждаемых удельных потоках энергии время проявления локального разогрева металла, может быть порядка микросекунды.

Плазменная компонента в паре, окружающем взрывающийся проводник заслуживает более детального анализа.

1. Воробьев В.С., Малышенко С.П., Ткаченко С.И. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2002. Т.75. С.445.
2. Ткаченко С.И., Хищенко К.В., Воробьев В.С. и др. // ТВТ. 2001. Т.39. С.728.
3. Недоспасов А.В., Хаит В.Д. // Основы физики процессов в устройствах с низкотемпературной плазмой. М.: Энергоатомиздат, 1991.
4. Батенин В.Н., Климовский И.И., Сергиенко Г.В. и др. // ТВТ. 1990. Т.28. С.1093.