

нения результатов необходимо ввести расчетную поправку для учета «галло» из нейтральных атомов в области пучка.

Авторы выражают благодарность Ю. Н. Днестровскому за плодотворные обсуждения.

Литература

- [1] *Ивочкиков А. Б., Петров М. П.* Физика плазмы, 1976.
- [2] *Афросимов В. В., Петров М. П., Садовников В. А.* Письма в ЖЭТФ, 1973.
- [3] *Гладковский И. П., Ивочкиков А. Б., Петров М. П.* Тез. докл. II совещ. по диагностике высокотемпературной плазмы. Харьков, 1977, с. 79.
- [4] *Давыденко В. И., Морозов И. И., Росляков Г. В.* Препринт ИЯФ СО АН СССР, № 80118. Новосибирск, 1980.
- [5] *Тихонов А. Н., Арсенин В. А.* Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979.
- [6] *Тихонов А. Н., Гончарский А. В., Степанов В. В., Ягола А. Г.* Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М.: Наука, 1983.
- [7] *Днестровский Ю. Н., Костомаров Д. П., Лысенко С. Е.* Препринт ИАЭ, № 2908. М., 1977.

Поступило в Редакцию

26 июня 1986 г.

В окончательной редакции

10 декабря 1986 г.

Журнал технической физики, т. 58, в. 12, 1988

РАВНОВЕСНЫЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОГО ЖИДКОГО ЭЛЕКТРОДА В ВАКУУМЕ

В. А. Барлетов, В. П. Коваленко, А. М. Рудько

В последние годы в связи с разработкой жидкометаллических эмиттеров электронов, ионов, заряженных кластеров и капель возрос интерес к взаимодействию проводящей жидкости с электрическим полем, в частности к исследованию устойчивости этой системы. В этих задачах нельзя обойтись без представлений о механическом равновесии искривленной поверхности проводящего жидкого электрода.

Несмотря на важность вопроса о равновесии, его разработка далека от завершения. Так, в большинстве работ, касающихся в той или иной степени равновесия формы поверхности жидкости в электрическом поле, цитируется работа Тейлора [1]. Между тем найденная Тейлором коническая поверхность может реализоваться лишь при определенных условиях (бесконечно протяженные электроды заданной геометрии, определенная разность потенциалов между ними). Кроме того, в теоретическом плане совершенно не ясна ситуация на вершине конуса. Оказывается, что с нее испускается струйка жидкости конечной толщины [1], т. е. фактически равновесия жидкости нет.

Аргументированная критика широкого безосновательного использования результатов Тейлора содержится в работах [2, 3]. Однако в первой из них авторы при формулировке условий равновесия допустили ошибку — используя энергетические соображения для нахождения действующей на поверхности силы, не учли, что система не замкнута. Близка к правильной постановка задачи, приведенная в [3], но и там (см. ниже) использовано граничное условие, не имеющее достаточного обоснования. Таким образом, приходится констатировать, что вопрос о равновесии до настоящего времени корректно даже не сформулирован.

В настоящей работе обсуждаются условия действительно равновесной формы поверхности жидкости, граничащей с электрическим полем, и приводятся соответствующие экспериментальные данные.

Рассмотрим следующую аксиально-симметричную диодную систему электродов, находящуюся в вакууме (рис. 1). Наружный электрод 1 считаем жестким, имеющим известную заданную форму $z_1(r)$. Потенциал этого электрода полагаем равным нулю. Жестким считаем и внутренний электрод 2, профиль которого $z_2(r)$ также известная заданная функция. Этот электрод контактирует с проводящей смачивающей жидкостью заданного объема V (штри-

ровка на рис. 1) и находится с одним из ней электростатическим потенциалом V . Требуется определить форму свободной поверхности жидкости $z_3(r)$ при гидростатическом равновесии. Гравитацией пренебрегаем.

В рассматриваемых условиях давление внутри жидкости складывается из давления Лапласа под искривленной поверхностью и электростатического давления. Равновесие имеет место лишь в том случае, если результирующее давление одинаково в каждой точке внутри жидкости. Оно не обязательно равно нулю, как представляется в работе [1]. Имеем

$$\sigma k(r) - E^2(r)/8\pi = \sigma k_0 - E_0^2/8\pi, \quad (1)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения границы жидкость—вакуум, $k(r)$ — кривизна поверхности жидкости, $E(r)$ — напряженность электрического поля у поверхности жидкости, k_0 и E_0 — кривизна поверхности жидкости и напряженность поля в точке $r=0$.

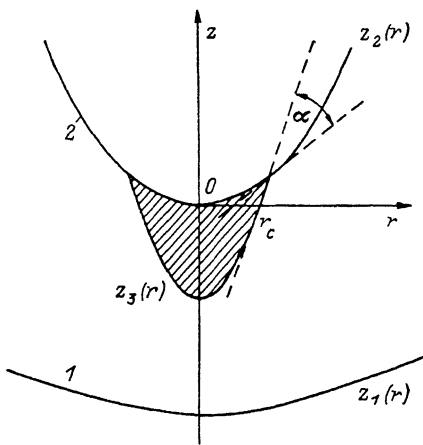


Рис. 1. Геометрия диода с жидким электродом.

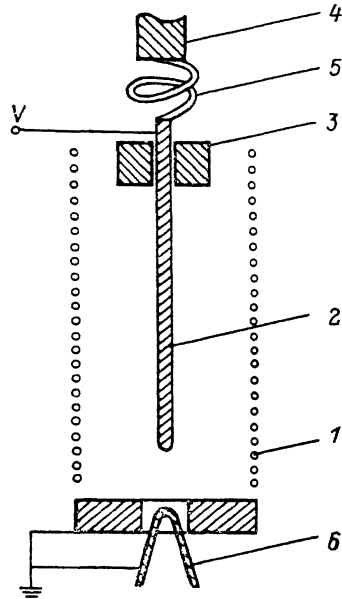


Рис. 2. Экспериментальная установка.

Соотношение (1) следует рассматривать как уравнение для искомой поверхности $z_3(r)$, поскольку

$$k(r) = \frac{r \frac{d^2 z_3}{dr^2} + \frac{dz_3}{dr} + \left(\frac{dz_3}{dr}\right)^3}{r \left[\left(\frac{dz_3}{dr}\right)^2 + 1 \right]^{3/2}}, \quad (2)$$

а $E(r)$ посредством решения уравнения Лапласа с заданными условиями для потенциала на поверхностях $z_1(r)$, $z_2(r)$ и $z_3(r)$ также однозначно выражается через $z_3(r)$. Решение уравнения (1) будет содержать, кроме k_0 , еще две константы C_1 и C_2 . Для нахождения неопределенных постоянных k_0 , C_1 и C_2 могут быть использованы следующие условия.

1. Потребуем, чтобы k и E имели конечные значения при $r=0$. В этом случае

$$\left. \frac{dz_3}{dr} \right|_{r=0} = 0. \quad (3)$$

2. Совершая в (2) предельный переход $r \rightarrow 0$ с учетом (3), получим

$$2 \left. \frac{d^2 z_3}{dr^2} \right|_{r=0} = k_0. \quad (4)$$

3. Используем постоянство объема жидкости

$$2\pi \int_0^{r_c} [z_2(r) - z_3(r)] r dr = V. \quad (5)$$

В работе [3] радиус линии контакта поверхностей жидкой и твердой фаз r_c считался неизменной заданной величиной. Однако не видно причин, по которым при изменении электрического поля и соответственно формы жидкого тела величина r_c не будет изменяться. В таком случае должно существовать еще одно условие. Мы предположим, что электрическое поле не влияет на угол смачивания α , и используем принятое в гидростатике требование постоянства этого угла [4]

$$\arcsin \frac{dz_3}{dr} \Big|_{r=r_c} - \arcsin \frac{dz_2}{dr} \Big|_{r=r_c} = \alpha. \quad (6)$$

Уравнение (1), уравнение Лапласа с граничными условиями на потенциал и условия (3) — (6) полностью определяют искомую равновесную поверхность.

Последующая часть настоящей работы посвящена экспериментальному наблюдению равновесной искривленной поверхности расплавленного металла в электрическом поле. Условия эксперимента ясны из рис. 2. На оси цилиндрического электрода 1, боковая поверхность которого выполнена из сетки, устанавливается провод 2 из электротехнической меди,

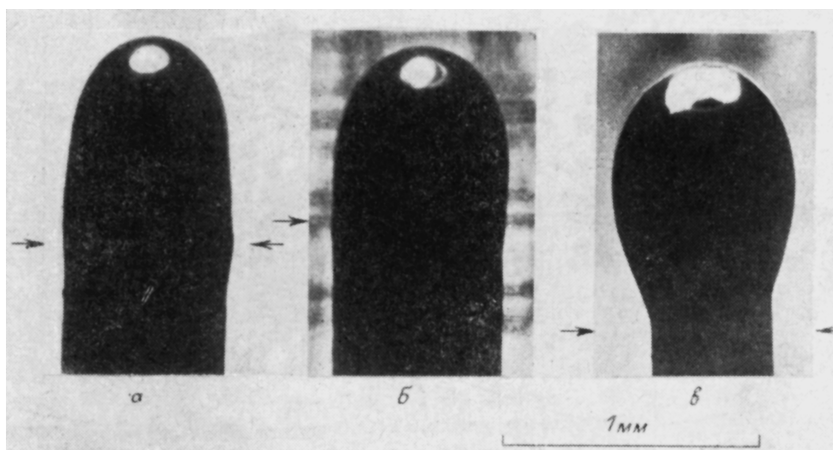


Рис. 3. Профили, приобретаемые жидким металлом в электрическом поле. Стрелками показана граница расплава.

свободно скользящий внутри графитовой втулки 3. Электрод 2 соединен с держателем 4 через пружинку 5. В центре основания электрода 1 имеется отверстие диаметром 2 мм. При подаче на электрод 2 положительного напряжения U в несколько киловольт и накале термоэмиттера 6 вершина электрода 2 расплавляется электронной бомбардировкой и приобретает некоторую равновесную форму, зависящую от количества расплава, расстояния до электрода 1 и напряжения U . Эксперимент можно было проводить либо в остаточном вакууме при давлении $\sim 3 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст., либо с напуском водорода до давления 10^{-3} мм рт. ст. Напуск водорода в сочетании с высокой температурой расплавленной части электрода 2 способствовал очистке поверхности расплава от возможных загрязнений.

Некоторые жидкометаллические фигуры приведены на рис. 3, а—в. Видно, что поверхности не являются коническими. В то же время они отличаются от сферической, что свидетельствует о существенном влиянии электрического поля.

С целью проверки соотношения (1) нами было измерено распределение электрического поля вдоль поверхности электрода 2. Измерения проводились посредством электролитической ванны с увеличенными в шестьдесят раз макетами электродов 1 и 2. Последний изготовлялся по фотографии рис. 3, б. Контроль измерений абсолютного значения напряженности электрического поля осуществлялся также по величине растяжения пружины 5 (рис. 2). Расхождение между измерениями двумя способами составляло примерно 13%. Результаты приведены на рис. 4. В отличие от рис. 1 начало отсчета на оси z совмещено с вершиной расплава. Там же приведен профиль жидкой части электрода 2 $r(z)$ и рассчитанные по нему зависимости лапласовского давления от z . При расчете последних мы использовали известные данные о σ для чистой меди [5] ($\sigma = 1.35$ Н/м, кривая 3) и более старые данные Зауэрвальда [5] ($\sigma = 1.115$ Н/м, кривая 4), полученные без особых мер по очистке меди.

Налицо отсутствие равенства капиллярного и электростатического давлений. Вместе с тем обращает на себя внимание то, что даже если сравнивать кривые 1 и 4, то разность давлений, представленных ими, монотонно изменяется с координатой. Согласно уравнению (1), этого не должно быть. Можно попытаться устранить это противоречие подбором подходящего, более низкого, значения σ , тем самым смещая вниз зависимость 4 до тех пор, пока расстояние между точками кривых 1 и 4 по оси ординат станет не зависящим от z (в пределах точности измерений). Оказывается, σ надо уменьшать до значения ~ 0.7 Н/м. Вряд ли загрязнение меди в наших условиях сами по себе могут настолько уменьшить σ .

Более естественным кажется предположение об уменьшении σ с ростом электрического поля у поверхности. При этом выравнивание разности между рассматриваемыми кривыми осуществляется легче. К сожалению, имеющихся данных недостаточно, для того чтобы установить действительную зависимость σ от E , так же как и причину ее существования. Эта зависимость может быть обусловлена либо перераспределением в электрическом поле возможной инородной пленки на поверхности расплава меди, либо непосредственным действием электрического поля на поверхностные ионы меди.

В пользу того, что последний эффект может быть замечен при таких, казалось бы, небольших полях ($E_0 = 3 \times 10^6$ В/см), приведем следующую оценку усредненной величины напряженности внутреннего электрического поля, препятствующего выходу иона на поверхность и приводящего к существованию поверхностного натяжения. Разделив значение σ на количество поверхностных ионов меди в 1 см^2 , получим работу выхода одного иона из глубины расплава на поверхность, равную примерно 0.4 эВ. Толщина приповерхностного слоя Δ , в котором совершается эта работа, оценивается обычно в 10^{-7} — 10^{-6} см. Зададимся минимальным значением этого диапазона $\Delta = 10^{-7}$ см, тогда соответствующая напряженность внутреннего поля равна $4 \cdot 10^6$ В/см. Измеренное в наших экспериментах значение внешнего поля у поверхности на порядок меньше, следовательно, оно может уже влиять на состояние поверхностного слоя, изменяя до 10% соответствующие параметры, в частности величину σ .

Безусловно, приведенные соображения представляют собой лишь грубую оценку. Вопрос о поверхностном натяжении проводящей жидкости, граничащей в вакууме с электрическим полем, требует специального изучения. Установление соответствующей зависимости, по-видимому, представляет интерес не только в связи с рассмотренной здесь узкой задачей о равновесии поверхности.

Литература

- [1] Taylor G. I. Proc. Roy. Soc., 1964, v. 280A, N 1382, p. 383—396.
- [2] Miskovsky N. M., Cutler P. H., Kazes E. J. Vac. Sci. Techn. B, 1985, v. 3, N 1, p. 202—206.
- [3] Chung M., Miskovsky N. M., Cutler P. H. et al. J. Vac. Sci. Techn. B, 1987, v. 5, N 6, p. 1628—1638.
- [4] Гидромеханика невесомости / Под ред. А. Д. Мышкиса. М.: Наука, 1976. 504 с.
- [5] Найдич Ю. В., Еременко В. Н., Фесенко В. В. и др. В кн.: Поверхностные явления в металлах и сплавах и их роль в процессах порошковой металлургии. Киев: Изд-во АН УССР, 1961. 62 с.

Институт физики АН УССР
Киев

Поступило в Редакцию
17 июля 1987 г.

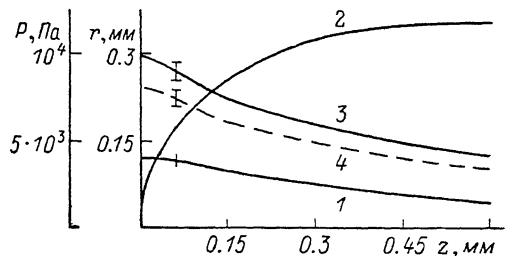


Рис. 4. Равновесный профиль жидкометаллического электрода в электрическом поле (2), абсолютное значение давления электрического поля на поверхность этого электрода (1) и рассчитанное давление Лапласа при $\sigma = 1.35$ Н/м (3) и $\sigma = 1.115$ Н/м (4).