

03;12  
©1993

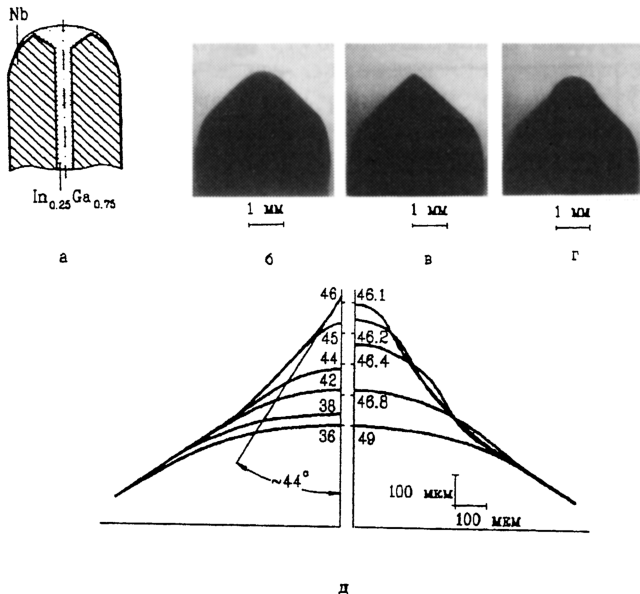
## НАБЛЮДЕНИЕ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ НА ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО КАТОДА

*А.В.Батраков, С.А.Попов, Д.И.Проскуровский*

Неустойчивость жидкого металла в сильном электрическом поле, впервые рассмотренная Тонксом [1] и Френкелем [2], представляют большой интерес для физики развития вакуумных разрядов и работы жидкометаллических источников заряженных частиц. Теоретический анализ динамики поведения жидкого металла в сильных электрических полях получил значительное развитие в последние годы [3-6]. Однако до сих пор отсутствуют прямые наблюдения динамики изменения формы жидкометаллического эмиттера. В работах [7,8] делались попытки наблюдения лишь отдельных фаз развития электрогидродинамической неустойчивости поверхности жидкости металла. Вместе с тем, можно выбрать условия эксперимента, которые позволяют относительно просто наблюдать процесс роста и распада выступа на поверхности жидкого металла.

При выборе условий эксперимента мы ориентировались на результаты Вармольца (ссылка [168] в [9]). При  $E \simeq 10^5$  В/см время запаздывания пробоя межэлектродного промежутка (0.125-0.250 мкм) с жидкометаллическим катодом составляло  $\sim 10^{-2}$  с. Если полагать, что это время определялось ростом выступа до высоты, соизмеримой с длиной вакуумного промежутка, то появляется возможность для прямого наблюдения динамики роста и распада такого выступа с помощью оптической аппаратуры.

Жидкометаллический катод диаметром 4 или 2 мм (рис. 1,а) и плоский анод образовывали вакуумный промежуток длиной 4 мм. Поверхность основы катода была хорошо смочена рабочей жидкостью (сплав  $\text{In}_{0.25}\text{Ca}_{0.75}$ ). Вакуум не хуже  $10^{-5}$  Па создавался безмасляными средствами откачки. На вакуумный промежуток с частотой 20-50 Гц подавались импульсы высокого напряжения, приводящие при полях  $E \simeq 10^5$  В/см и выше к развитию на поверхности жидкого металла электрогидродинамической неустойчивости, формированию выступа и возбуждению взрывной



**Рис. 1.**

*а* — конструкция катодов; *б, в, г* — фотографии некоторых фаз развития и распада электрогидродинамической неустойчивости на поверхности катода; *д* — профили выступа жидкого металла в различные моменты времени для случая, представленного на рис. 2, *а*; цифрами обозначены моменты времени в мс, соответствующие данным состояниям жидкометаллической поверхности.

электронной эмиссии. В результате возбуждения взрывной эмиссии происходил вакуумный разряд подключенного к промежутку конденсатора емкостью 50–250 пФ за время  $\sim 10^{-7}$  с. Амплитуда тока составляла 20–40 А. Во время разряда происходил спад напряжения на промежутке и начинался распад выступа. Хорошая воспроизводимость времени запаздывания разряда и процессов на катоде при таком импульсно-периодическом воздействии позволили применить стробоскопическую теневую фотосъемку поверхности работающих катодов. С этой целью разрядный промежуток подсвечивался лампой-вспышкой с длительностью импульса света  $\sim 5$  мкс, а регулированием задержки запуска лампы-вспышки относительно начала импульса напряжения фиксировали различные фазы колебаний поверхности жидкого металла. Типичные фотоснимки профилей выступа, зафиксированные в различные моменты времени, представлены на рис. 1, *б–г*. Пространственное разрешение использованного метода теневой фотосъемки составляло  $\sim 15$  мкм.

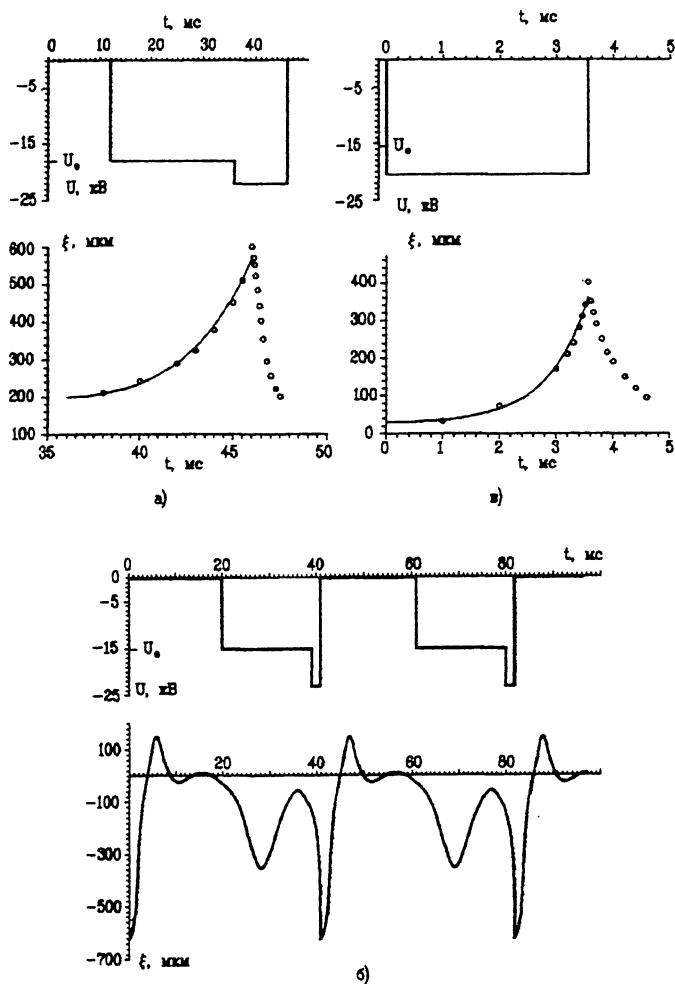


Рис. 2. Зависимости напряжения  $U$ , приложенного к вакуумному промежутку, и высоты формируемого на поверхности выступа  $\xi$  от времени.

$a$  — катод  $\varnothing 4$  мм ориентирован против направления силы тяжести,  $б$  — катод  $\varnothing 4$  мм ориентирован по направлению силы тяжести,  $в$  — катод  $\varnothing 2$  мм. В случаях  $a$  и  $в$  на зависимостях  $\xi(t)$  сплошными линиями показаны теоретические кривые.

На рис. 2,  $a$  представлен случай подачи ступенчатого импульса напряжения на катод  $\varnothing 4$  мм, ориентированный против направления силы тяжести. Амплитуда первой ступени импульса напряжения была несколько ниже порогового напряжения  $U_0$  развития неустойчивости, приводящей к инициированию взрывной электронной эмиссии. На этой фазе заметного возмущения поверхности жидкого металла не на-

блюдалось. На второй ступени импульса напряжения развивалась неустойчивость, приводящая к формированию заостряющейся конической структуры типа "касп" (рис. 1, д), причем угол конуса вблизи вершины был близок к углу конуса Тейлора. С возбуждением взрывной эмиссии рост конуса прекращался и начинался его распад с образованием волны на поверхности жидкого металла. Изменение высоты выступа в течение цикла  $\xi(t)$  представлено на рис. 2, а.

Результаты измерений для катода, ориентированного по направлению силы тяжести, представлены на рис. 2, б. В этом случае формировался конус с полууглом при вершине  $\sim 48^\circ$ . Кроме того, имели место явно выраженные резонансные эффекты. Амплитуда раскачки поверхности достигала максимальных значений при частотах, для которых кратна собственная частота колебаний поверхности жидкости ( $\approx 100$  Гц). При достижении условий резонанса раскачка поверхности жидкости наблюдалась и для первого случая, но амплитуда колебаний была существенно меньше из-за демпфирующего влияния силы тяжести.

На рис. 2, в представлены результаты изменений  $\xi(t)$  для катода  $\varnothing 2$  мм, ориентированного горизонтально. По-видимому, из-за большей частоты собственных колебаний жидкости резонансные явления в этом случае не наблюдались. Форма вытягиваемого конусообразного выступа была подобна приведенной на рис. 1, д.

Сопоставление экспериментальных зависимостей  $\xi(t)$  с теоретическими показало, что наибольшее согласие достигается при использовании выражения, полученного в [5, 6]

$$\xi(0, t) = \xi_0 \exp [E^2 t^2 (4\pi\rho\lambda^2)^{-1}],$$

где  $\xi_0$  — начальная флуктуация поверхности,  $\rho$  — плотность жидкого металла. Это выражение описывает рост высоты неоднородности в виде гауссоиды  $\exp(-x^2/\lambda^2)$  при развитии капиллярногравитационной неустойчивости на плоской поверхности и получено в линейном приближении ( $\xi < \lambda$ ).

Наилучшее совпадение экспериментальных и расчетных кривых имеет место, если значения  $\lambda$  принять близкими к диаметрам катодов, что соответствует развитию основной моды колебаний жидкости на поверхности катода. Величина начальных возмущений  $\xi_0$  для случая, представленного на рис. 2, а, составила  $\sim 200$  мкм, и  $\sim 30$  мкм для случая, представленного на рис. 2, в. Такие значения  $\xi_0$  можно объяснить, по-видимому, исходной кривизной поверхности жидкого металла.

Сопоставление зависимостей  $\xi(t)$  на фазе распада выступа с теоретической, приведенной в [5, 6], дает лишь качественное согласие. Возможно, это связано с тем, что в

[5,6] рассматривался распад выступа, имеющего исходную форму в виде гауссоиды.

В заключение отметим, что предлагаемая методика прямого наблюдения возбуждения электрогидродинамической неустойчивости может дать ряд новых сведений о динамике поведения жидкого металла в сильных электрических полях.

Благодарим Л.М.Баскина за полезные дискуссии.

### Список литературы

- [1] Tonks L. // Phys. Rev. 1935. V. 48. P. 562.
- [2] Френкель Я.И. // Phys. Zs. der Sowietunion. 1935. N 8. P. 675.
- [3] Владимиров В.В., Головинский П.М. // ЖТФ. 1983. Т. 53. В. 1. С. 128–133.
- [4] Thompson S.P., Prewett P.S. // J. Phys. S: Appl. Phys. 1984. V. 17. P. 2305–2321.
- [5] Баскин Л.М., Фурсей Г.Н. // Тез. докл. VI Всес. симп. по сильноточной электронике. Томск, 1986. Ч. II. С. 67–69.
- [6] Baskin I.M. // IEEE Trans. Electr. Insul. 1989. V. 24. P. 929–931.
- [7] Барташюс И.Ю., Праневичюс Л.И., Фурсей Г.Н. // ЖТФ. 1971. Т. 53. В. 9. С. 1943–1948.
- [8] Swanson L.M., Schwind G.A. // J. Appl. Phys. 1978. V. 49. P. 5655–5662.
- [9] Сливков И.Н., Михайлов В.И., Сидоров Н.И. и др. Электрический пробой и разряд в вакууме. М.: Атомиздат, 1966. 300 с.

Институт сильноточной  
электроники СО РАН  
Томск

Поступило в Редакцию  
21 июля 1993 г.