

# Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

К. Б. Абрамова, В. П. Валицкий, Ю. В. Вандакуров, Н. А. Златин, Б. П. Перегуд, Магнито-гидродинамические неустойчивости при электрическом взрыве, *Докл. АН СССР*, 1966, том 167, номер 4, 778–781

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.9.168

22 марта 2025 г., 15:30:47



К. Б. АБРАМОВА, В. П. ВАЛИЦКИЙ, Ю. В. ВАНДАКУРОВ, Н. А. ЗЛАТИН,  
Б. П. ПЕРЕГУД

### МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВЗРЫВЕ

(Представлено академиком Б. П. Константиновым 31 V 1965)

1. В работе (1) было установлено, что существует энергетический порог электрического взрыва: если величина энергии, введенной в проводник  $E_{\text{введ}}$ , меньше некоторой пороговой величины  $E_{\text{пор}}$ , процесс не носит характера взрыва. Энергия  $E_{\text{пор}}$  оказалась больше энергии плавления, но меньше энергии, необходимой для испарения проволоочки. Это заставило отказаться от общепринятого представления механизма взрыва, состоящего в том, что взрыв является быстрым «мгновенным» испарением сильно перегретого металла (2).

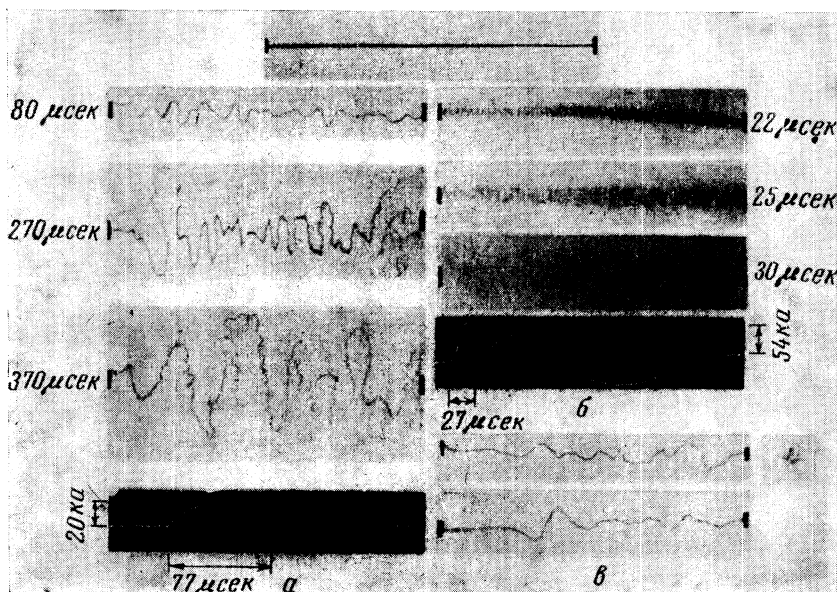


Рис. 1

Задачей исследования, основные результаты которого излагаются в настоящем сообщении, являлось выяснение механизма разрушения материала проводника при электрическом взрыве. Исследование проводилось с помощью рентгеновской импульсной установки, позволявшей получать теневые фотографии проволоочки и продуктов взрыва с экспозицией 0,1—0,2 мкс. В течение проведения одного эксперимента можно было получить 4 рентгенограммы, соответствующие любым моментам времени, заданным относительно начала протекания тока через проволоочку. Опыты проводились с медными, вольфрамовыми, молибденовыми и свинцовыми проволоочками и со струей жидкого свинца.

2. На рис. 1 приведены осциллограммы тока и рентгенограммы медной проволоочки диаметром 0,5 мм и длиной 70 мм ( $E_{\text{пор}} = 290$  Дж. (1)). Рент-

генограммы рис. 1а получены в допороговом режиме  $E_{\text{введ}} = 180$  дж, рис. 1б — в режиме электрического взрыва  $E_{\text{введ}} = 800$  дж. Проекции проволоочки на три взаимно перпендикулярные плоскости при  $E_{\text{введ}} = 180$  дж  $< E_{\text{пор}}$ , полученные с помощью трех рентгеновских трубок, срабатывавших одновременно, см. рис. 1в.

Совокупность многочисленных полученных в процессе исследования рентгенограмм и осциллограмм, аналогичных приведенным на рис. 1, дает представление о том, что происходит с проводником в допороговом режиме и в режиме электрического взрыва. При протекании по проводнику тока большой плотности возникают и развиваются неустойчивости двух типов, приводящие к изменению формы проводника и, в конце концов, к многочисленным его разрывам. В допороговом режиме развивается винтовая неустойчивость (рис. 1а и 1в). В режиме электрического взрыва развивается перетяжечная неустойчивость (рис. 1б), которая никогда не проявится в допороговом режиме. Естественно предположить, что неустойчивости имеют магнитогидродинамическое происхождение. Аналогичные явления наблюдались в линейных пинчах.

3. Проведен анализ устойчивости жидкого цилиндра в магнитном поле протекающего по нему тока с учетом конечной проводимости и сил поверхностного натяжения. Поскольку  $E_{\text{пор}} > E_{\text{пл}}$ , проволочка, во всяком случае в момент возникновения перетяжечной неустойчивости, действительно находится в жидкой фазе. Оценки показывают, что скин-эффект в проведенных опытах не играет заметной роли, поэтому распределение тока было принято однородным по сечению проводника. Считалось, что в равновесном состоянии проводника давление в жидкости обусловлено силами поверхностного натяжения и магнитным давлением.

Исходя из обычной системы магнитогидродинамических уравнений, изучалась устойчивость проводника относительно возмущения  $f(r) \exp [i(m\phi + kz + \omega t)]$ , где  $r, \phi, z$  — цилиндрические координаты,  $t$  — время,  $m$  — целое число,  $k = 2\pi / \lambda$ ,  $\lambda$  — длина волны возмущения.

Метод вывода дисперсионного соотношения без учета сил поверхностного натяжения разработан в статьях (3, 4), с учетом сил поверхностного натяжения — в статьях (5, 6). Получены зависимости величины безразмерного инкремента  $\Omega = i\omega r_0 \sqrt{4\pi\rho} / H_0$  от  $x = kr_0$  ( $r_0$  — радиус цилиндра) для  $m = 1$  и  $m = 0$  и для разных значений параметров  $q$  и  $f$ , учитывающих плотность  $\rho$ , проводимость  $\sigma$ , коэффициент поверхностного натяжения  $\alpha$  и поле на поверхности цилиндра  $H_0$ ;  $q^2 = \frac{r_0\sigma H_0}{c^2} \sqrt{\frac{4\pi}{\rho}}$ ;  $f = 4\pi\alpha / r_0 H_0^2$ . Кривые этих зависимостей в области значений  $0 \leq x \leq 3,5$  приведены на рис. 2. При  $x \gg 1$  инкремент достигает максимального значения  $\Omega_{\text{max}} \approx \sqrt{2}$  в точке  $x = 1 / \sqrt[4]{3f}$  для возмущения  $m = 0$  и в точке  $x = \sqrt[4]{4/3f}$  для возмущения  $m = 1$ . По величине  $\Omega$  можно найти постоянную времени нарастания неустойчивости  $\tau = r_0 \sqrt{4\pi\rho} / H_0 \Omega$ .

4. Таким образом, возможность развития наблюдавшихся в опытах неустойчивостей вытекает из теоретического рассуждения. Случай  $m = 0$

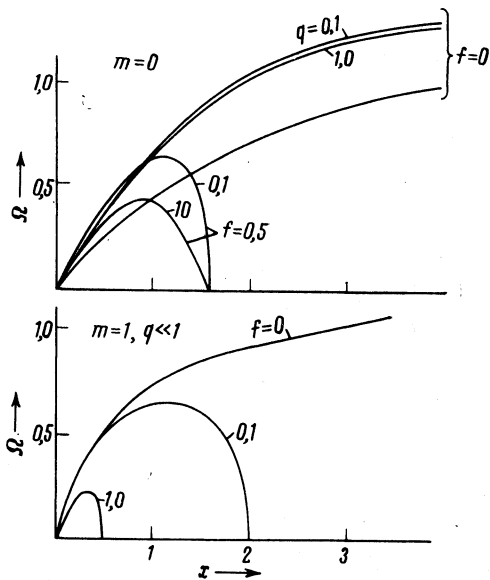


Рис. 2

соответствует перетяжечной неустойчивости,  $m = 1$  — винтовой. Неустойчивости более высоких (мод  $m > 1$ ) должны приводить лишь к изменению формы поперечного сечения, не вызывая искривления осевой линии и оставляя площадь поперечного сечения неизменной вдоль оси. Эти неустойчивости не должны приводить к обрывам проводника и не могут быть замечены на рентгенограммах.

В описанных выше опытах величина параметра  $q$  лежала в пределах  $0,1-0,8$ . Параметр  $f$  для расплавленного проводника имел величину  $0,4 \cdot 10^{-5} - 7 \cdot 10^{-5}$ . Определенные из рентгенограмм длины волн возмущений  $m = 0$  во всех случаях отличаются от расчетных значений  $\lambda_{\text{расч}}$  не более чем в 2—3 раза. Расчетные и экспериментальные значения длин волн возмущений  $m = 1$  отличаются в 70 раз. Поскольку  $\lambda_{\text{эксп}} > \lambda_{\text{расч}}$ , расхождение можно объяснить тем, что винтовая неустойчивость возникает и начинает развиваться до начала плавления проволоочки. Энергия, потребная для изгиба и растяжения твердой холодной проволоочки, в несколько раз меньше энергии, нужной для создания наблюдаемого в опытах числа перетяжек, но существенно больше  $E_{\text{пор}}$ . Силы сопротивления в этом случае больше электродинамических сил по крайней мере на два порядка величины. Но с ростом температуры предел текучести меди быстро падает (7) и развитие винтовой неустойчивости при температуре, близкой к температуре плавления, становится возможным. В специально поставленных опытах, когда  $E_{\text{введ}} < E_{\text{пл}}$ , проволочка после прохождения тока оставалась изогнутой. При переходе проволоочки в жидкую фазу силы сопротивления резко падают и оказывается возможным развитие перетяжечной неустойчивости\*. Таким образом получает объяснение тот факт, что  $E_{\text{пор}} > E_{\text{пл}}$ .

Опыты по электрическому взрыву струи жидкого свинца подтвердили описанную последовательность развития неустойчивостей — при сравнительно малых  $E_{\text{введ}}$  сразу развивается перетяжечная неустойчивость.

5. Перетяжечная неустойчивость развивается и рвет проводник за время порядка  $10^{-6}$  сек. После того как неустойчивость возникла, выделение джоулева тепла сосредоточивается в перетяжках, и в этих местах может происходить испарение металла. Испарение происходит локально в течение малого промежутка времени. До разрушения проводника успевает испариться лишь незначительная часть вещества. Следовательно, энергия  $E_{\text{пор}}$  должна быть меньше энергии испарения  $E_{\text{исп}}$ , что и наблюдается на опыте. Так как с ростом  $E_{\text{введ}}$  увеличивается скорость развития неустойчивости ( $\Omega$  пропорционально  $H_0$ ), то полного испарения вещества может не происходить даже в тех случаях, когда  $E_{\text{введ}} \gg E_{\text{исп}}$ . Этот вывод совпадает с предположением, сделанным на основе феноменологических данных в работе (4).

Если  $E_{\text{введ}} \gg E_{\text{пор}}$ , ввод энергии производится быстро (велико начальное напряжение) и винтовая неустойчивость до плавления проводника не успевает развиваться. Именно такому случаю соответствуют рентгенограммы рис. 3б и 3в ( $E_{\text{введ}} = 800$  дж). Если же  $E_{\text{введ}}$  больше  $E_{\text{пор}}$ , но близко к нему, должны проявляться неустойчивости обеих мод, что подтверждается рентгенограммами проводника, взорванного при  $E_{\text{введ}} = 290$  дж  $= 1,2 E_{\text{пор}}$  (рис. 3а). Длина волны винтовой неустойчивости, возникающей после перехода проводника в жидкую фазу, меньше  $r_0$ , и ее трудно идентифицировать при наличии перетяжечной неустойчивости.

6. Теория, результаты опытов и изложенные выше соображения приводят к заключению, что возникновение паузы тока является результатом развития перетяжечной магнитогидродинамической неустойчивости. На рис. 3 приведены рентгенограммы медной (3б) и свинцовой (3в) проволоки, полученные в момент, предшествующий резкому спаду тока и в кон-

\* Остается пока неясным, почему в твердом нагретом проводнике не развивается длинноволновая перетяжечная неустойчивость, требующая меньшей энергии на разрушение проводника, чем наблюдаемая коротковолновая.

де спада тока. На осциллограммах тока отмечены моменты, в которые было произведено рентгенографирование. Видно, что ко времени начала спада тока проволочка еще является правильным цилиндром и разрывов не имеет. Диаметр цилиндра в этот момент примерно в два раза больше диаметра проволочки в исходном состоянии. По прошествии менее 6 мсек, в конце спада тока, перетяжная неустойчивость уже развита на-

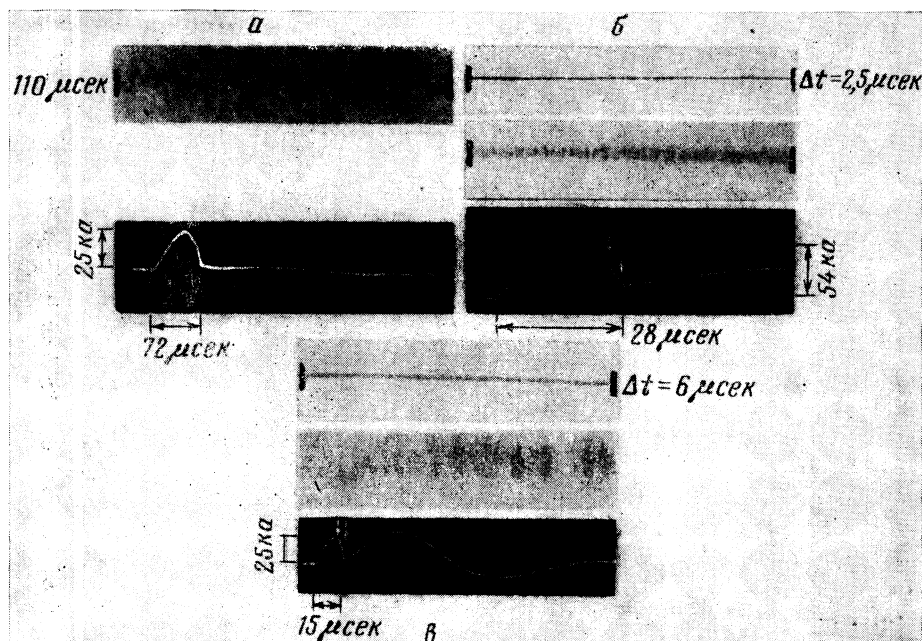


Рис. 3

столько сильно, что ясно видны многочисленные периодически расположенные разрывы. Диаметр жидких «линз» между разрывами в несколько раз больше диаметра жидкого цилиндра. Постоянная времени нарастания неустойчивости, рассчитанная по проведенной выше формуле, составляет для медной проволочки  $\tau = 0,2$  мсек., для свинцовой  $\tau = 0,1$  мсек. Из рентгенограмм рис. 3 видно, что экспериментальные величины хорошо совпадают с расчетными.

7. Опыты по электрическому взрыву молибденовых и вольфрамовых проволочек с очевидностью показали, что и в этом случае разрушение происходит в результате развития неустойчивости  $m = 0$ . Однако ток после достижения максимального значения в первом импульсе уменьшается всего в 2—3 раза, в течение некоторого времени сохраняется на этом уровне и затем, после наступления «повторного зажигания», вновь растет. Развитие неустойчивости начинается лишь после достижения током амплитудного значения в первом полупериоде колебательного разряда. До этого разрывов не наблюдается, и падение проводимости в конце первого импульса тока развитием неустойчивости не может быть объяснено.

Авторы приносят глубокую благодарность акад. Б. П. Константинову за плодотворные обсуждения, стимулировавшие постановку и выполнение этой работы.

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе  
Академии наук СССР

Поступило  
19 V 1965

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Б. П. Перегуд, К. Б. Абрамова, ДАН, 157, № 4 (1964). <sup>2</sup> И. Ф. Кварцхава, А. А. Плюто, В. В. Бондаренко, ЖЭТФ, 30, в. 1, 42 (1956); M. Keilhacker, Zs. angew. Phys., 12, 49 (1961); В. Г. Чейз, УФН, 85, № 2, 381 (1956). <sup>3</sup> R. Y. Taylor, Rev. Mod. Phys., 32, 907 (1960); С. Н. Бреус, ЖТФ, 30, 1030 (1960). <sup>4</sup> Ю. В. Вандакуров, Прикл. матем. и мех., 26, № 5, 877 (1962); 27, № 1, 46 (1963); ЖТФ, 33, в. 2, 145 (1963). <sup>5</sup> G. S. Murty, Arkiv Fysik, 19, 483 (1961). <sup>6</sup> A. S. Gupta, Proc. Roy. Soc., 278, 214 (1964). <sup>7</sup> А. Надаи, Пластичность и разрушение твердых тел, ИЛ, 1954.