

УДК 537.84:532.522

В. А. Бернштам, В. Б. Журавлев, И. Я. Каган, И. М. Манзон

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ТОКОНЕСУЩЕЙ СТРУИ

В ряде технологических процессов [1, 2] и устройств [3] используются жидкометаллические токонесущие струи. Для стабильной работы таких устройств часто бывает необходимо поддерживать величину тока в струе постоянной. Однако этому препятствует развитие МГД неустойчивостей, под воздействием которых струя периодически изменяет свою форму и, как следствие, величину электрического сопротивления. Это может привести к существенным колебаниям текущего по струе тока. При превышении же током некоторого критического значения длина неразрушимого участка струи [4, 5] может стать меньше заданной длины струи, что приводит к полному разрыву струи и исчезновению текущего по ней тока или его скачку (при зажигании в месте разрыва электрической дуги).

Как известно [6], на струе развиваются МГД неустойчивости двух типов: перетяжечная и винтовая. Однако, как показывают оценки, инкременты того и другого типа неустойчивости оказываются примерно одинаковыми. Это означает, что в момент, когда перетяжечная неустойчивость приведет к разрыву струи, винтовая — лишь к отклонению ее от невозмущенного положения на величину порядка радиуса струи. Сказанное иллюстрирует приведенная на рис. 1 фотография. Эти соображения позволяют при математическом моделировании эволюции электрического сопротивления жидкометаллической токонесущей струи ограничиться рассмотрением только перетяжечной МГД неустойчивости. Исследование влияния МГД неустойчивости типа перетяжки на электрическое сопротивление жидкометаллического цилиндра, образующегося при электрическом взрыве тонкой проволоки, было подробно проведено в работе [7], методике которой в основном следуют в дальнейшем авторы. Однако развитие МГД неустойчивости типа перетяжки на жидкометаллическом цилиндре, каковым является расплавленная проволока, и на жидкометаллической струе, несмотря на многие общие черты, имеет свои отличия. Все перетяжки,

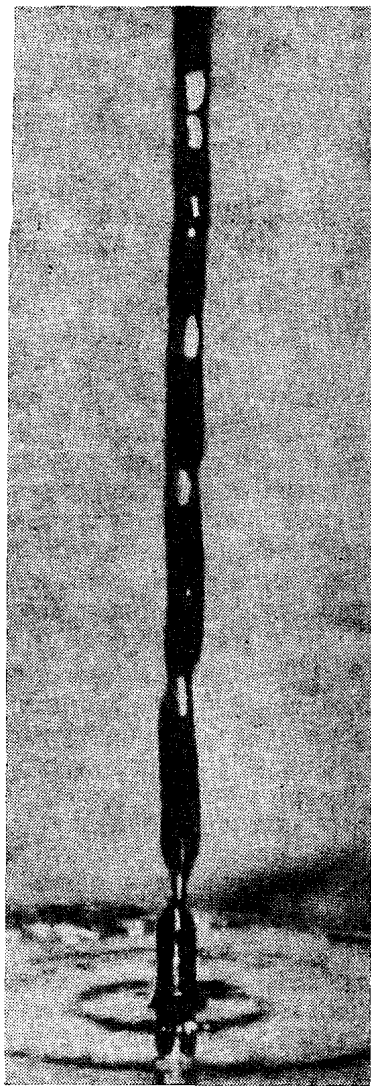


Рис. 1. К иллюстрации развитых перетяжечной и винтовой неустойчивостей жидкометаллической струи.

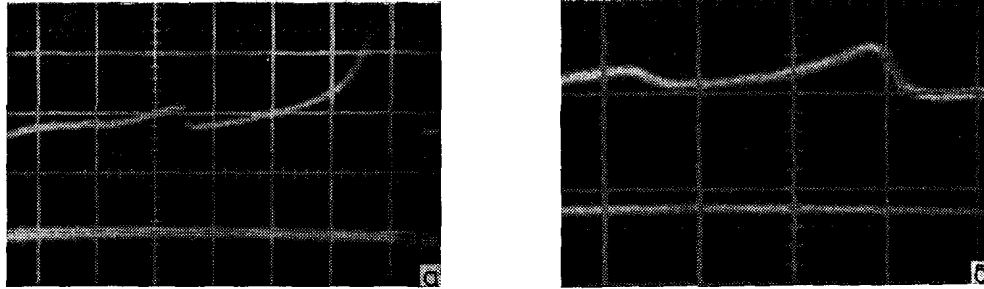


Рис. 2. Осциллограммы напряжения на жидкометаллической струе с током, приводящим (а) и не приводящим (б) к разрушению струи и зажиганию электрической дуги (в случае а). Цена деления по времени 5 мс.

развивающиеся на жидкометаллическом цилиндре, «живут» одно и то же время. Поэтому через некоторое время жидкометаллический цилиндр распадается на несколько жидкометаллических мостиков, соединенных горящими между ними дугами. В жидкометаллической же струе возмущения, зарождающиеся в форсунке, формирующей струю, начинают развиваться с момента выхода из нее и в дальнейшем сносятся вдоль направления движения струи. При конечной длине струи наиболее развитой оказывается перетяжка, максимально удаленная от форсунки (см. рис. 1); именно в районе этой перетяжки максимальна вероятность зажигания дуги. Здесь, на последнем этапе развития перетяжки, происходит особенно интенсивный рост электрического сопротивления струи, так как наряду с резким уменьшением площади сечения в месте перетяжки происходит сильный разогрев жидкого металла, увеличивающий его удельное сопротивление.

Описанная картина качественно подтверждается осциллограммами, показывающими зависимость падения напряжения на струе от времени (рис. 2). Измерения проводились на струе эвтектического сплава Ga—In—Sn длиной 10 см, вытекающей из вертикально расположенной форсунки диаметром 5 мм при токе промышленной частоты, равном 357 А. Параметры электрической цепи выбирались таким образом, чтобы ток определялся сопротивлением внешнего по отношению к струе участка цепи. Эксперимент проводился на установке, подробно описанной в работе [6].

Рассмотрим на основе линейной модели [4] изменение во времени электрического сопротивления жидкометаллической токонесущей струи. Будем рассматривать эволюцию величины сопротивления струи, вызванную развитием единственной гармоники возмущения с волновым числом k , соответствующим максимальному инкременту (подобное рассмотрение может быть проведено и для возмущения произвольной формы, разложенного в ряд Фурье).

Пренебрежем естественным утонением свободно падающей вертикальной струи, обязанным силе тяжести, т. е. ограничим рассмотрение горизонтальными струями, струями, имеющими высокую скорость истечения из форсунки, и короткими струями в том смысле, что приращение скорости за время движения жидкости вне форсунки оказывается невелико по сравнению с начальной скоростью истечения струи. Кроме того, предположим, что в каждом сечении струи ток по сечению распределяется равномерно, т. е. пренебрежем скин-эффектом.

Допустим также, что разогрев жидкого металла происходит адиабатически. Это допущение может быть оправдано тем, что в той фазе нагрева, когда температура металла в районе перетяжки становится достаточно высокой, чтобы теплообмен металла в струе с окружающей средой оказывался существенным, скорость дальнейшего нагрева и разрушения струи уже велика.

Рассмотрим жидкометаллическую струю в системе координат, ось z которой направлена вдоль оси струи по направлению ее течения, а начало координат ($z=0$) совпадает со срезом форсунки (рис. 3). Длина струи равна L . Будем считать, что в этой системе координат на поверхности струи развивается синусоидальное осесимметричное возмущение ξ с инкрементом δ , волновым числом k , начальной амплитудой ξ_0 и начальной фазой φ_0 :

$$\xi = \xi_0 \sin (k(z + v_0 t) + \varphi_0) \exp (\delta z / v_0),$$

где v_0 — скорость истечения струи. В этом выражении величины возмущений обезразмерены по величине невозмущенного радиуса струи. Вид выражения для ξ отражает тот факт, что возмущения не распространяются вдоль струи, т. е. фиксированная точка струи с координатой $z = z_0 - v_0 t$ имеет одну и ту же фазу в любой момент времени t .

При вычислении сопротивления жидкометаллической струи необходимо учитывать тот факт, что за счет джоулева разогрева увеличивается удельное электрическое сопротивление жидкого металла. Особенно интенсивно разогрев металла происходит в местах перетяжек. Для учета зависимости удельного сопротивления от температуры воспользуемся методикой, предложенной в работе [7].

С учетом принятых допущений можно записать количество тепла dQ , получаемого единичным объемом жидкого металла за время dt :

$$dQ = j^2 \rho dt, \quad (1)$$

где j — плотность тока в данном сечении струи; ρ — удельное электрическое сопротивление жидкого металла в этом сечении. Выражение для плотности электрического тока в струе имеет вид

$$j = j_0 / (1 - \xi)^2,$$

где ξ — безразмерное возмущение поверхности; j_0 — плотность тока в невозмущенной струе.

Известно, что

$$\rho = \rho_0 (1 + \beta Q), \quad (2)$$

где $\beta = \alpha / (cd)$; α , c , d — температурный коэффициент изменения сопротивления, удельная теплоемкость и плотность жидкого металла. Из (1) и (2) получаем уравнение

$$dQ / (1 + \beta Q) = \rho_0 j^2 dt.$$

Проводя интегрирование, находим

$$\rho = \rho_0 (1 + \beta Q) = \rho_0 \exp \left(\rho_0 \beta \int_0^{t_1} j^2 dt' \right). \quad (3)$$

Время t_1 , в течение которого происходит нагрев, будем отсчитывать от момента выхода жидкого металла из форсунки. Таким образом,

$$t_1 = z / v_0. \quad (4)$$

Теперь в выражении (3) перейдем от интегрирования по времени к интегрированию по величине возмущения ξ . Для этого обратимся к системе координат y , t , связанной со струей и движущейся вместе с ней: $y - y_0 = z - v_0 t$, где $ky_0 = \varphi_0$. Тогда выражение для безразмерного возмущения принимает вид

$$\xi = \xi_0 \sin ky \exp \{ [y - (y_0 - v_0 t)] \delta / v_0 \},$$

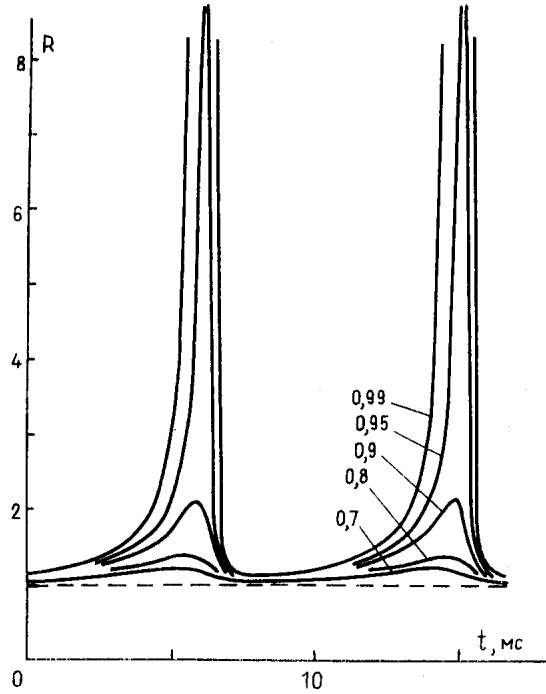
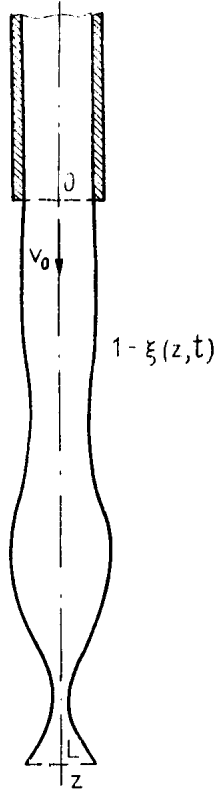


Рис. 3. К постановке задачи.

Рис. 4. Зависимости относительного сопротивления струи от времени при значениях ξ_{\max} , указанных на рисунке.

что позволяет записать

$$t = \frac{1}{\delta} \ln \frac{\xi}{\xi_0 \sin ky} + \frac{y_0 - y}{v_0}.$$

С учетом (4) перейдем в выражении (3) к интегрированию по ξ :

$$\rho(y, t) = \rho_0 \exp \left[\frac{\rho_0 \beta j_0^2}{\sigma} \int_{\xi_0 \sin ky}^{\xi} \frac{d\xi}{\xi (1-\xi)^4} \right]. \quad (5)$$

Интеграл, стоящий в правой части (5), берется в квадратурах:

$$\int_{\xi_0 \sin ky}^{\xi} \frac{d\xi}{\xi (1-\xi)^4} = \left[\ln \frac{\xi}{1-\xi} + \frac{3\xi}{1-\xi} + \frac{3\xi^2}{2(1-\xi)^2} + \frac{\xi^3}{3(1-\xi)^3} \right]_{\xi_0 \sin ky}^{\xi}. \quad (6)$$

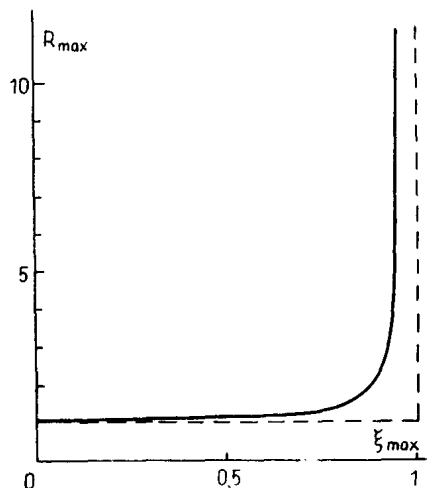
Зная площадь сечения струи $S(y, t) = \pi r_0^2 (1-\xi)^2$, можно вычислить величину сопротивления всей струи:

$$R(t) = \int_{y_0 - v_0 t}^{y_0 - v_0 t + L} \frac{\rho(y, t)}{S(y, t)} dy. \quad (7)$$

Подставляя в (7) выражение (5) с учетом (6), получаем соотношение, из которого путем численного интегрирования находим зависимость электрического сопротивления струи от времени.

На рис. 4 показаны зависимости сопротивления струи от времени для различных начальных амплитуд возмущений. Амплитуды выбира-

Рис. 5. Зависимость относительного максимального сопротивления струи от ξ_{\max} .



лись таким образом, чтобы максимальное возмущение ξ_{\max} лежало в пределах $0 \leq \xi_{\max} < 1$. Сравнение экспериментальных (см. рис. 2) и расчетной (см. рис. 4) зависимостей напряжения от времени дает их качественное совпадение. На рис. 5 представлена зависимость максимального электрического сопротивления струи (отнесенного к сопротивлению невозмущенного цилиндра) от максимальной величины возмущения, успевающей развиться на струе (отнесенной к радиусу невозмущенной струи).

При сопоставлении результатов расчета с экспериментальными данными необходимо учитывать, что в реальных условиях возмущения носят случайный характер; струя жидкого металла в экспериментальной установке двигалась вниз, и это вело к ее утонению, которое не учитывалось в модели. Эти факторы необходимо учитывать при использовании описанных результатов наряду с традиционными погрешностями линейной модели. Тем не менее построенную математическую модель можно применять для качественного описания электрического сопротивления токнесущей струи электропроводной жидкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесниченко А. Ф. Технологические МГД-установки и процессы. — Киев: Наукова думка, 1980. — 192 с.
2. Казачков И. В., Колесниченко А. Ф. Электромагнитное возбуждение волн на поверхности радиально растекающихся пленок вязкой электропроводной жидкости // 12-е Риж. совещ. по магнит. гидродинамике. Т. 1. — Саласпилс, 1987. — С. 119...122.
3. Харитонов В. В., Юринов В. М., Злобина О. А. Переходные процессы в ударных униполярных генераторах. — М.: Атомиздат, 1980. — 187 с.
4. Гельфгат Ю. М., Лиелаусис О. А., Щербинин Э. В. Жидкий металл под действием электромагнитных сил. — Рига: Зинатне, 1976. — 247 с.
5. Бернштам В. А., Водянюк В. О., Каган И. Я. и др. Перетяжная неустойчивость струи с током [Препринт № 592 Ин-та электродинамики АН УССР]. — Киев, 1988. — 54 с.
6. Абрамова К. Б., Златин Н. А., Перегуд Б. П. Магнитогиродинамические неустойчивости жидких и твердых проводников. Разрушение проводников электрическим током // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1975. — Т. 69, вып. 6 (12). — С. 2007...2022.
7. Лев М. Л., Перегуд Б. П. Поведение электрического сопротивления проводников при развитии МГД неустойчивостей // Журн. техн. физики — 1979. — Т. 49, вып. 11. — С. 2368...2375.

Поступила в редакцию 05.01.89