

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА МЕДНЫХ ПРОВОДНИКОВ В ВОЗДУХЕ

М. А. Горлач

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе рассмотрен электрический взрыв проводников (ЭВП), представляющий собой явление резкого изменения физического состояния проводника при пропускании по нему импульсного тока большой плотности. Круг технических применений электрического взрыва постоянно растет. Так, в импульсной электронике явление ЭВП используется для получения импульсов напряжения значительной амплитуды и малой длительности; с помощью ЭВП осуществляют электровзрывное напыление металла, а также получают мощные импульсы рентгеновского излучения. Поэтому количественное моделирование ЭВП имеет значительный практический интерес. Целями настоящей работы является:

- проведение расчетов характеристик электрического взрыва тонких медных проволочек в воздухе в рамках модели квазистационарного нагрева и выяснение недостатков этой модели;
- обзор основных положений одномерной МГД модели ЭВП и дополнительное исследование некоторых соотношений, входящих в систему уравнений магнитной гидродинамики;
- анализ следствий эмпирического уравнения состояния меди Бакулина–Куропатенко–Лучинского [4] и сравнение рассчитанных термодинамических параметров меди с табличными данными.

РАСЧЁТЫ ПО МОДЕЛИ КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО НАГРЕВА

В рамках этого подхода предполагается существование однозначной связи между энергией, введенной в проводник, и сопротивлением этого проводника: $\frac{R}{R_0} = f(w)$. Вид функции $f(w)$ подбирается на основании

опыта. Протекание электровзрыва описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений [1]–[3]. Поскольку при ЭВП изменяются свойства вещества проводника, то эта система нелинейна.

В данной работе проведены расчеты ЭВП по модели квазистационарного нагрева. Результаты расчета сопоставлены с экспериментальными данными, относящимися к электровзрыву тонких медных проволочек, включенных в LC-контур (рис.1). Условия экспериментов – в таблице. d – диаметр взрываваемой проволочки, l – ее длина, C_0 – емкость конденсатора, заряженного первоначально до напряжения U_0 , n – число параллельно соединенных проволочек, L_0 – индуктивность разрядной цепи. Вид функции $f(w)$ при моделировании выбирался так, чтобы возможно точнее описать опорный эксперимент (№1 в таблице). Таким образом, на начальном этапе ЭВП имеется удовлетворительное согласие расчета и эксперимента, но резкий обрыв кривых тока, получаемый при расчете, не всегда соответствует действительности. Следовательно, необходимо более детальное рассмотрение процессов в проводнике, происходящих при ЭВП. Такое рассмотрение может быть проведено в рамках магнито-гидродинамической (МГД) модели.

Таблица

Условия экспериментов по электрическому взрыву меди

№ эксперимента	d , мм	C_0 , мкФ	n	L_0 , мкГн	U_0 , кВ	l , мм
1	0,100	0,400	4	15,7	80	500
2	0,100	0,600	2	28,0	80	800

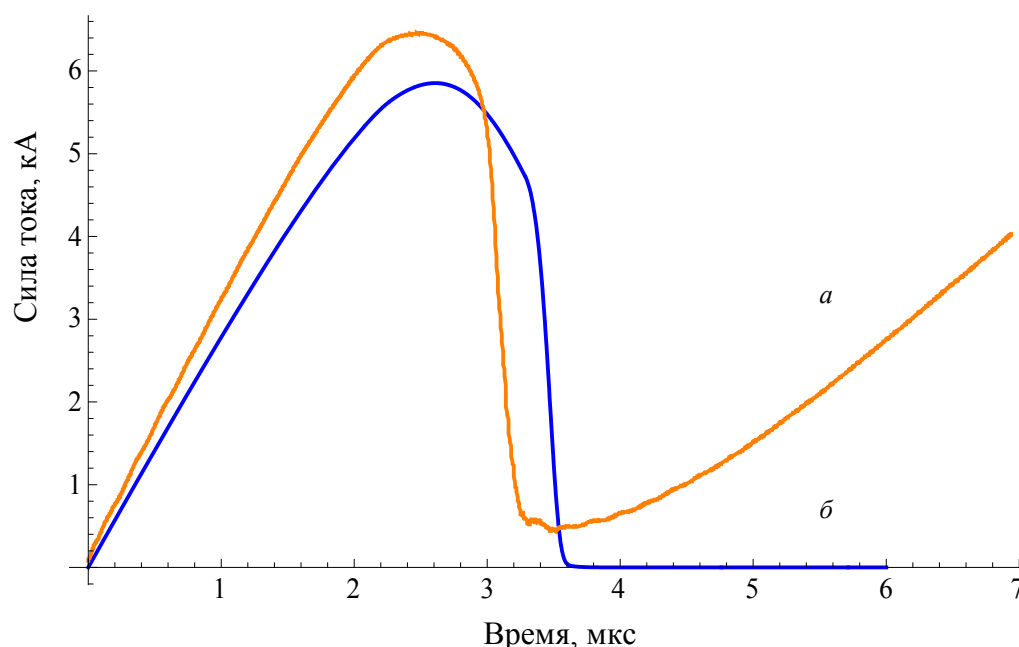


Рис.1. Зависимость силы тока в разрядной цепи от времени.

Эксперимент №2:

a – эксперимент; b – расчет в рамках модели квазистационарного нагрева.

ОДНОМЕРНАЯ МГД МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА. УРАВНЕНИЕ БАКУЛИНА-КУРОПАТЕНКО-ЛУЧИНСКОГО

Постановка задачи об электрическом взрыве проводника (проволочки или фольги) в рамках одномерной МГД модели дана в [1], [4], [5]. Для описания движения вещества взрывающегося проводника используется метод Лагранжа. Неизвестными являются 10 функций лагранжевой координаты и времени (напряженность электрического поля, индукция магнитного поля, плотность электрического тока, температура, давление и т.д.). Эти функции определяются системой из 6 уравнений в частных производных (получаются из фундаментальных законов физики) плюс 4 уравнения связи (содержат информацию о свойствах вещества взрывающегося проводника). К последней группе уравнений относятся термическое и калорическое уравнения состояния вещества проводника. Относительно простое уравнение состояния меди предложено в [4], однако в литературе отсутствуют данные относительно области применимости данного уравнения. В настоящей работе этот пробел частично восполняется за счёт явного введения температуры в уравнение Бакулина–Куропатенко–Лучинского и сопоставления рассчитанных термодинамических параметров меди с табличными данными [6]. В качестве примера на рис. 2 приводятся данные о температурной зависимости коэффициента объемного расширения меди.

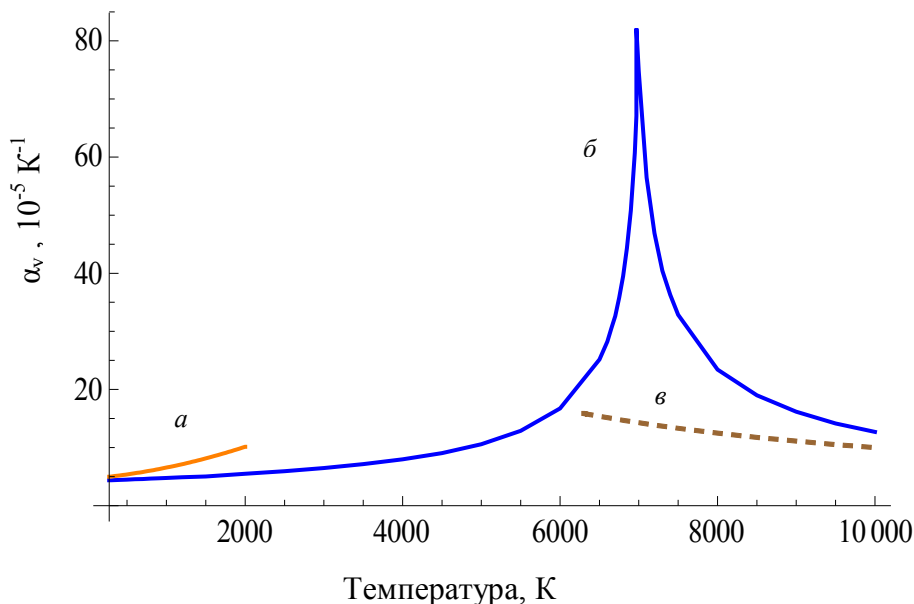


Рис.2. Зависимость коэффициента объемного расширения меди от температуры при нормальном давлении:
а– табличные данные [6]; *б*–результаты расчета; *в* – идеальный газ.

Из проведенного анализа вытекают следующие свойства уравнения Бакулина–Куропатенко–Лучинского:

- уравнение состояния не включает стадию плавления меди, а учитывает лишь фазовый переход «жидкость-газ»;
- для термодинамических параметров меди при умеренных температурах ($300\text{K} < T < 1350\text{K}$) получаются адекватные результаты, удовлетворительно согласующиеся с табличными данными, хотя возможны погрешности в высокотемпературной ($T > 1350\text{K}$) области;
- рассчитанное значение критической температуры меди $T_k = 7,47 \cdot 10^3 \text{ K}$ достаточно близко к оценке, приводимой в [1].
- вычисление давления из уравнения Бакулина–Куропатенко–Лучинского приводит к систематическому завышению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрены основные подходы к моделированию явления электрического взрыва: модель квазистационарного нагрева и одномерная МГД модель. Проведено дополнительное исследование соотношений, входящих в систему уравнений МГД: термического и калорического уравнений состояния меди. В уравнение Бакулина–Куропатенко–Лучинского явным образом введена температура. Рассчитано значение критической температуры и основных термодинамических параметров меди.

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю А.А. Гуринович за постановку задачи, многочисленные обсуждения и советы.

Литература

1. Бурцев В. А., Калинин Н. В., Лучинский А. В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. М., Энергоатомиздат, 1990.
2. Столович Н. Н. Электровзрывные преобразователи энергии. Минск, Наука и техника, 1983.
3. Месяц Г. А. Импульсная энергетика и электроника. М., Наука, 2004.
4. Бакулин Ю. Д., Куропатенко В. Ф., Лучинский А. В. Магнитогидродинамический расчёт взрывающихся проводников // Журнал технической физики. 1976. Т. 46. №9. С.1963–1969.
5. Barysevich A. E., Cherkas S. L. Testing the equation of state and electrical conductivity of copper by the electrical wire explosion in air: experiment and magnetohydrodynamic simulation // Physics of Plasmas. 2011. Vol. 18. №5. P. 21–30.
6. Физические величины (справочник) / Под ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. М., Энергоатомиздат, 1991.