

УДК 533.95

Graphic Dependences for Determination of Temperature and Electric Field Strength in Arc Discharge

Evgeniy N. Vasil'ev*

*Institute of Computational Modeling SB RAS
50/44 Academgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia*

Received 17.12.2014, received in revised form 01.04.2015, accepted 19.09.2015

The dependences of the temperature T and electric field strength E on the current I and radius R for a axisymmetric stationary equilibrium arc discharge in air, argon, carbon dioxide and hydrogen under atmospheric pressure are determined from the solution to the Elenbaas–Heller equation. The results of computations are given on diagrams in the plane $lgI-R$ in the form of lines of constant values. The diagrams make it possible to rapidly estimate parameters of the arc discharge for the given values of I and R .

Keywords: the arc discharge, temperature, electric field strength, power balance.

DOI: 10.17516/1999-494X-2015-8-7-901-907.

Графические зависимости для определения температуры и напряженности электрического поля в дуговом разряде

Е.Н. Васильев

*Институт вычислительного моделирования СО РАН
Россия, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/44*

На основе решения уравнения Эленбааса-Хеллера рассчитаны зависимости температуры T и напряженности электрического поля E от радиуса R и силы тока I для осесимметричного стационарного равновесного дугового разряда в воздухе, аргоне, углекислом газе и водороде при атмосферном давлении. Результаты расчетов представлены на диаграммах в плоскости $lgI-R$ в виде линий постоянных значений T и E . Диаграммы позволяют оперативно оценивать параметры дугового разряда для заданных значений R и I .

Ключевые слова: дуговой разряд, температура, напряженность электрического поля, энергетический баланс.

Введение

При разработке и оптимизации новых электродуговых устройств и технологий необходима информация об энергетическом состоянии разрядной плазмы. Экспериментальное исследование и измерение энергетических параметров требует очень значительных материальных и временных затрат. Расчетное определение параметров разрядов проводится с помощью вычислительных моделей различной степени сложности, основанных на совместном численном решении систем уравнений газовой динамики и электродинамики [1–4]. Такие задачи, как правило, являются ресурсоемкими, требуют мощных вычислительных средств и больших временных затрат на разработку и тестирование. По этим причинам остается актуальным применение более простых одномерных математических моделей, позволяющих оперативно рассчитывать основные параметры дуговых разрядов. С помощью такой математической модели на основе уравнения Эленбааса-Хеллера были исследованы особенности формирования дугового разряда в теплопроводном и радиационных режимах [5, 6]. Также были рассчитаны и построены на плоскости $\lg I-R$ изолинии для заданных характерных соотношений интегральных и удельных мощностей механизмов теплопроводности и излучения в разряде и определены соответствующие им зависимости температуры и напряженности электрического поля для различных газов [7–9]. Эти зависимости, прежде всего, устанавливали границы диапазонов влияния и доминирования энергетических механизмов и давали возможность определять значения параметров разряда, соответствующие этим граничным состояниям. Однако для промежуточных энергетических состояний, особенно вдали от границ, проводить оценку значений параметров разряда с помощью зависимостей для граничных состояний достаточно сложно. Графические зависимости, представленные в данной работе, дают возможность определения температуры и напряженности электрического поля с меньшей погрешностью в более широком диапазоне значений радиуса и силы тока.

Постановка задачи

Для расчета распределения температуры в осесимметричном разряде использовано уравнение Эленбааса-Хеллера, описывающее баланс энергетических механизмов джоулевой диссипации, теплопроводности и излучения

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q_J - q_R = 0, \quad (1)$$

где r – радиус; T – температура; λ – коэффициент теплопроводности газа; $q_J = \sigma E^2$ – мощность джоулевой диссипации; q_R – объемная мощность радиационных энергопотерь. Уравнение (1) дополняется граничными условиями в центре разрядной области и на внешней границе

$$\left[\frac{\partial T}{\partial r} \right]_{r=0} = 0, \quad [T]_{r=R} = T_0. \quad (2)$$

Напряженность электрического поля E зависит от силы тока и распределения электропроводности $\sigma(r)$ по радиусу:

$$E = I / 2\pi \int_0^R \sigma(r) r dr. \quad (3)$$

Электрические дуги при поперечном размере высокотемпературной зоны порядка 1 см имеют малую оптическую толщину, поэтому для расчета величины q_R было использовано приближение объемного излучателя [5].

Решение краевой задачи (1) – (3) проводилось численно с учетом температурных зависимостей свойств газов, которые вводились в программу в виде таблиц для степеней черноты $\epsilon(T)$, коэффициентов электропроводности $\sigma(T)$ и теплопроводности $\lambda(T)$. Коэффициенты черноты воздуха взяты в [10, 11], аргона в [12], углекислого газа в [11], водорода в [13]. Транспортные свойства воздуха в [14], аргона в [15], углекислого газа в [16], водорода в [17, 18].

Результаты расчетов

Вычислительная модель позволяет рассчитать структуру и параметры разряда для разных газов при различных значениях силы тока I и радиуса расчетной области R . Из решения уравнений (1)–(2) определяется распределение температуры и электропроводности, с помощью формулы (3) рассчитывается напряженность электрического поля E . Для проверки адекватности вычислительной модели проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных. На рис. 1 приведены результаты измерений температурного распределения в дуговом разряде, горящем в углекислом газе [19]. Температурный профиль дуги определяли несколькими спектроскопическими методами, ошибки в измерении температуры составляли 6–7 %. На график с обобщенным экспериментальным профилем (кривая 1) наложено расчетное распределение температуры (кривая 2). Расчетное значение температуры на оси разряда $T_{max} = 10,54$ кК и отличается от измеренного примерно на 4 %, в периферийной части разряда разница увеличивается, по-видимому, из-за влияния обдува дуги, необходимого для ее пространственной стабилизации. Такое отличие в значениях T_{max} находится в пределах ошибки

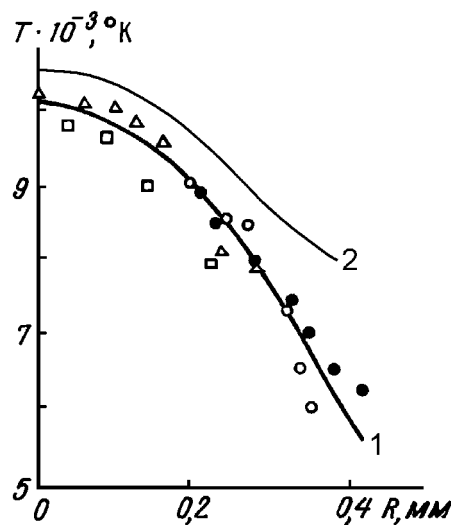


Рис. 1. Радиальное распределение температуры в разряде при $R = 1$ мм

измерений температуры и погрешности расчета теплофизических свойств газов, которая, по мнению авторов работ [10–18], составляет от нескольких процентов до 20–30 %. Данный расчет структуры разряда был проведен при величинах пространственного шага в 0,05 и 0,025 мм, при этом различие в значении T_{max} для этих двух вариантов было зафиксировано незначительным ($\approx 0,02$ %).

Важнейшими характеристиками дугового разряда являются температура и напряженность электрического поля. От величины температуры в столбе разряда зависят переносные свойства плазмы и интенсивность взаимодействия с электромагнитным полем, а напряженность электрического поля определяет мощность, необходимую для компенсации энергопотерь и поддержания разряда. Для определения характеристик разряда были проведены расчеты в достаточно широком диапазоне значений радиуса $R = 2 \div 40$ мм и силы тока $I = 1 \div 10\,000$ А. На основе расчетов построены в виде изолиний графические зависимости T_{max} и E на плоскости $\lg I - R$ для разряда в воздухе, аргоне, углекислом газе и водороде при атмосферном давлении. Значения на изолиниях T_{max} приведены в КК, на изолиниях E в размерности кВ/м. Расчеты проведены при величине пространственного шага 0,5 мм, при необходимости величина шага снижалась до 0,1 мм.

Графические зависимости для воздуха представлены на рис. 2. Изолинии максимальной температуры в центре разряда T_{max} отображены с шагом 0,5 кК (рис. 2а). Поскольку на рис. 2 изолинии расположены достаточно близко друг к другу, значения температуры в кК даны только для части изолиний, имеющих увеличенную толщину. Изолинии напряженности электрического поля E построены с переменным шагом (рис. 2б). При малых значениях E изолинии имеют две ветви, которые имеют угол наклона противоположного знака. Ветви соответствуют разным режимам теплоотвода из столба разряда: нижние расположены к области, где преобладает теплопроводный механизм, верхние лежат в зоне доминирования излучения. В месте перегиба изолиний влияние теплопроводного и радиационного механизмов в энергобалансе разряда является соизмеримым.

На рис. 3 приведены характеристики дугового разряда в аргоне. Изолинии максимальной температуры T_{max} также отображены с шагом 0,5 кК, значения на изолиниях даны с шагом 1 кК

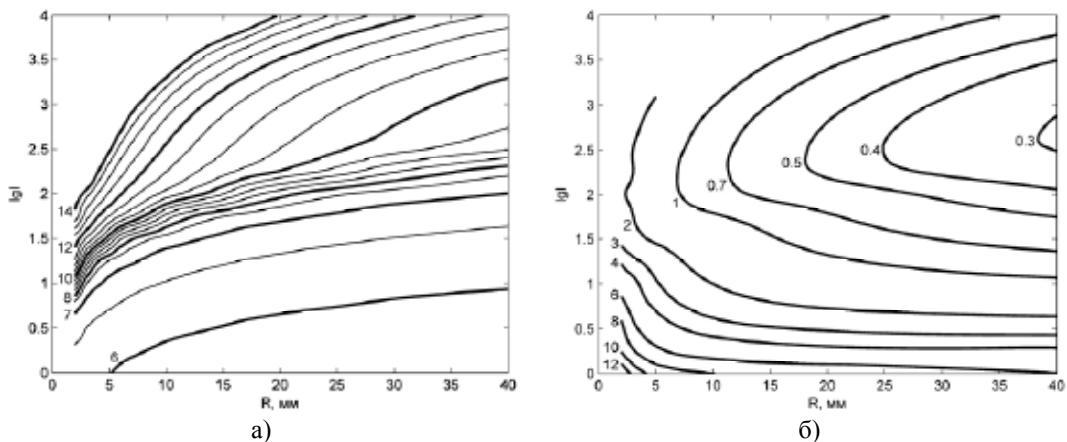


Рис. 2. Изолинии температуры (а) и напряженности электрического поля (б) для разряда в воздухе

(рис. 3а). Изолинии напряженности электрического поля E приведены с переменным шагом. При сравнении характеристик разряда в воздухе и аргоне для изолиний T_{max} в аргоне следует отметить более равномерное и упорядоченное расположение, а для напряженности электрического поля характерны существенно меньшие значения.

Особенностью графических зависимостей для разряда в углекислом газе является наличие достаточно протяженных горизонтальных участков изолиний T_{max} и E в диапазоне больших значений радиуса и малых значений силы тока, которому соответствует правая нижняя часть плоскости $\lg I-R$ (рис. 4). На горизонтальных участках изолиний характеристики разряда не зависят от его радиуса. Данная особенность разряда в CO_2 ранее была отмечена и исследована в [8], где была установлена ее причина – эффект экранирования теплопроводного механизма вблизи внешней границы разряда. Этот эффект обусловлен высокими значениями степени

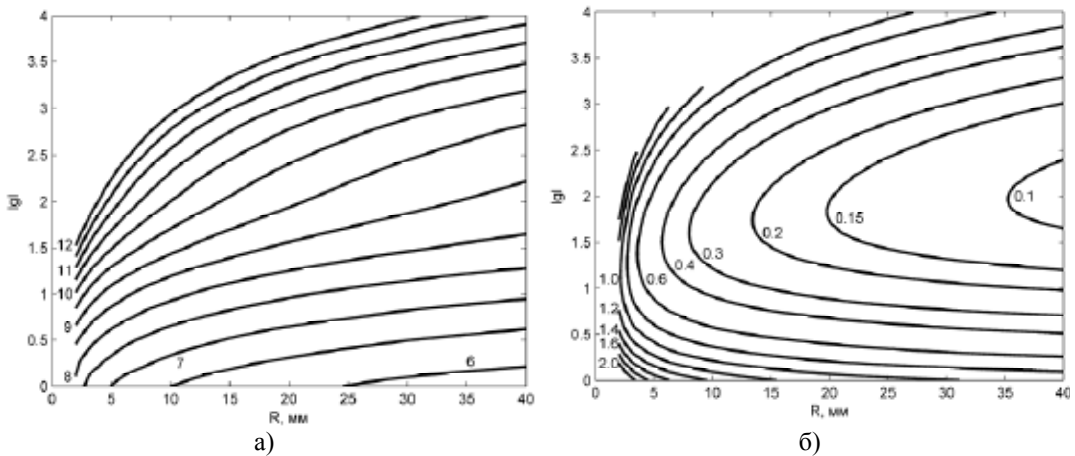


Рис. 3. Изолинии температуры (а) и напряженности электрического поля (б) для разряда в аргоне

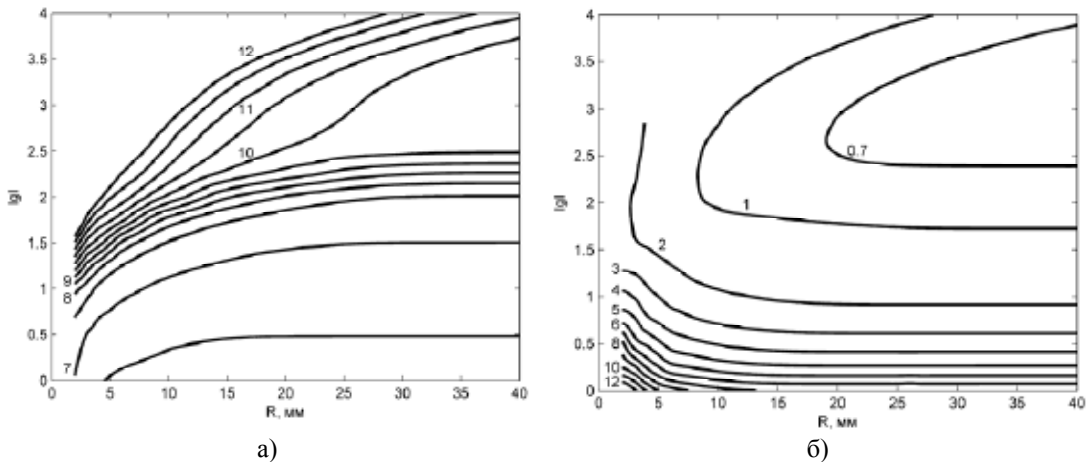


Рис. 4. Изолинии температуры (а) и напряженности электрического поля (б) для разряда в углекислом газе

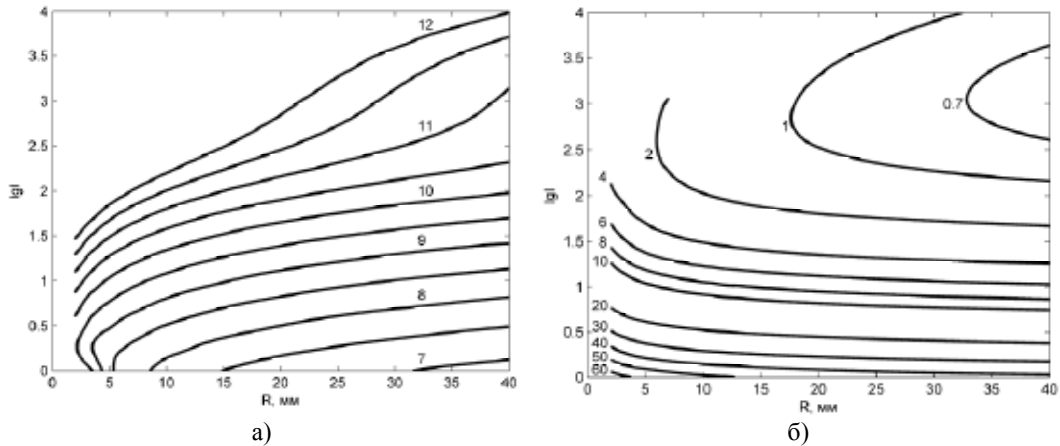


Рис. 5. Изолинии температуры (а) и напряженности электрического поля (б) для разряда в водороде

черноты CO_2 в диапазоне низких температур (1–2 кК), при этом периферийный слой газа с такой температурой, имеющий высокую излучающую способность, отводит всю подводимую от центральной горячей зоны теплоту за пределы разряда путем радиационного механизма, фактически экранирует центральную высокотемпературную зону разряда от теплопроводного теплообмена с внешней стенкой и тем самым обеспечивает пространственную локализацию столба разряда.

Характеристики дугового разряда в водороде отображены на рис. 5. Отличительной особенностью разряда в водороде является существенно более высокие значения напряженности электрического поля, особенно в области малых значений силы тока. Это обусловлено большим значением коэффициента теплопроводности. Так, зависимость $\lambda(T)$ для водорода имеет локальный максимум $\lambda_{\max} = 15.1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ при $4 \cdot 10^3 \text{ К}$, а значения λ_{\max} для воздуха и углекислого газа находятся на уровне $4 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ при $T = 7 \cdot 10^3 \text{ К}$. Таким образом, повышенная мощность теплопроводных энергопотерь для разряда в водороде компенсируется за счет большей напряженности электрического поля.

Заключение

В работе представлены в виде диаграмм на плоскости $\lg I-R$ характеристики равновесной электродуговой плазмы для некоторых технически важных газов. Графические зависимости для гелия были приведены в [9]. Демонстрируемые графические зависимости дают общую картину энергетического состояния электродуговой плазмы и позволяют оперативно оценивать температуру, напряженность электрического поля и энергетические затраты в осесимметричном стационарном дуговом разряде, горящем в воздухе, аргоне, углекислом газе и водороде при атмосферном давлении, в широком диапазоне значений радиуса и силы тока.

Список литературы

- [1] Васильев Е.Н., Деревянко В.А., Славин В.С. // Теплофизика высоких температур. 1986. Т. 24. № 5. С. 844.

- [2] *Васильев Е.Н., Нестеров Д.А.* // Вестник Красноярского государственного университета. 2004. № 5. С. 104.
- [3] *Васильев Е.Н., Нестеров Д.А.* // Теплофизика высоких температур. 2005. Т. 43. № 3. С. 401.
- [4] *Васильев Е.Н., Нестеров Д.А.* // Теплофизика высоких температур. 2007. Т. 45. № 2. С. 165.
- [5] *Васильев Е.Н.* // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17. № 3. С. 441.
- [6] *Васильев Е.Н.* // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2013 (6). № 2. 183.
- [7] *Васильев Е.Н.* // Журнал технической физики. 2012. Т. 82. № 12. С. 47.
- [8] *Васильев Е.Н.* // Журнал технической физики. 2013. Т. 83. № 10. С. 26.
- [9] *Васильев Е.Н.* // Журнал технической физики. 2014. Т. 84. № 12. С. 38.
- [10] *Авилова И.В., Биберман Л.М., Воробьев В.С. и др.* Оптические свойства горячего воздуха. М.: Наука, 1970. 320 с.
- [11] *Каменщиков В.А., Пластинин Ю.А., Николаев В.М., Новицкий Л.А.* Радиационные свойства газов при высоких температурах. М.: Машиностроение, 1971. 440 с.
- [12] *Ветлуцкий В.Н., Онуфриев А.Т., Севастьяненко В.Г.* // Журнал прикладной механики и технической физики. 1965. № 4. С. 71.
- [13] *Москвин Ю.В.* // Теплофизика высоких температур. 1968. Т. 6. № 1. С.1.
- [14] *Соколова И.А.* // Журнал прикладной механики и технической физики. 1973. № 2. С. 80.
- [15] *Devoto R.S.* // Physics of Fluids. 1967. V. 10. № 2. P. 354.
- [16] *Андриатис А.В., Соколова И.А.* // Математическое моделирование. 1995. Т. 7. № 2. С. 89.
- [17] *Devoto R.S.* // Journal of Plasma Physics. 1968. V. 2. № 4. P. 617.
- [18] *Копански Ю.* // Теплофизика высоких температур. 1973. Т. 11. № 3. С. 644.
- [19] *Киселевский Л.И., Соловьянчик Д.А., Фещенко З.П.* // Журнал прикладной спектроскопии. 1972. Т. 16. № 2. С. 234.