

УДК 533.95

Расчет границ радиационного и теплопроводного режимов дугового разряда

Е.Н. Васильев*

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

Received 15.03.2013, received in revised form 22.03.2013, accepted 31.03.2013

По результатам расчета в осесимметричной постановке структуры, удельных и интегральных мощностей энергетических механизмов стационарного равновесного дугового разряда определены границы радиационного и теплопроводного режимов горения разряда в воздухе, углекислом газе и аргоне.

Ключевые слова: дуговой разряд, энергетический баланс, излучение, теплопроводность.

Введение

При постановке и выполнении исследовательских задач, практическом использовании дуговых разрядов может быть полезна информация о параметрах газоразрядной плазмы и степени воздействия различных физических факторов на ее состояние. На параметры плазмы наибольшее влияние оказывают энергетические механизмы, от вклада которых зависят распределения температуры и электропроводности, другие характеристики разряда. В свою очередь, соотношение мощности энергетических механизмов определяется параметрами процесса: силой тока, давлением, геометрическими размерами, транспортными и радиационными свойствами рабочего газа. Для случая стационарной дуги, ограниченной цилиндрической стенкой, определенного газа и заданного давления характеристики разряда зависят прежде всего от силы тока I и радиуса стенки R_0 . В данной статье по результатам расчетов структуры разряда и характеристик энергетического баланса в широком диапазоне значений силы тока и радиуса стенки определены на плоскости $I-R_0$ границы радиационного и теплопроводного режимов и соответствующие им значения максимальной температуры для дугового разряда в воздухе, аргоне и углекислом газе. Работа является развитием исследований [1, 2], в которых рассмотрены особенности формирования структуры дугового разряда в воздухе и определены границы радиационного режима.

Постановка задачи

Рассмотрим электродугую плазму, находящуюся в состоянии локального термодинамического равновесия, при атмосферном давлении данное приближение применимо при силе тока $I \geq 10$ А [3]. Тепловыделение в электропроводном газе обеспечивается за счет джоулевой

© Siberian Federal University. All rights reserved

* Corresponding author E-mail address: ven@icm.krasn.ru

диссипации, основными механизмами отвода теплоты от столба разряда являются излучение и теплопроводность. Конвекция, как известно, не оказывает существенного влияния на энергобаланс сильноточной дуги, ограниченной стенкой. Как показали данные измерений, вклад конвекции в ртутной дуге атмосферного давления не превышал 1 % [4].

Распределение температуры в разряде, горящем в цилиндрическом объеме и имеющем осевую симметрию, описано уравнением Эленбааса-Хеллера следующего вида:

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

где r – радиус, T – температура, $q_J = \sigma E^2$ – мощность джоулевой диссипации, q_R – объемная мощность радиационных энергопотерь, λ и σ – коэффициенты теплопроводности и электропроводности газа, E – напряженность электрического поля.

Уравнение (1) дополняется граничными условиями в центре разрядной области

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

и на внешней границе

$$[T]_{r=R_0} = T_0. \quad (3)$$

Напряженность электрического поля зависит от силы тока и распределения электропроводности по радиусу

$$E = I / 2\pi \int_0^{R_0} \sigma r dr. \quad (4)$$

Электрические дуги, как правило, имеют поперечный размер, не превышающий нескольких сантиметров, и малую оптическую толщину. В этом случае излучение имеет преимущественно объемный характер. Так, в работе [5] было показано, что учет переноса излучения в виде лучистой теплопроводности начинает оказывать какое-либо заметное влияние на характеристики разряда в аргоне при атмосферном давлении только при температурах свыше 15 000 К. С учетом этого в данной математической модели для расчета радиационных энергопотерь было использовано приближение объемного излучателя [1].

Реальные газы имеют сложные нелинейные температурные зависимости теплофизических свойств, что обуславливает необходимость применения численных методов. Решение краевой задачи (1)–(4) проводилось с помощью конечноразностного алгоритма, величина пространственного шага в расчетах принималась равной 0.5 мм. Коэффициенты черноты воздуха взяты в [6], [7], аргона в [5], углекислого газа в [7], транспортные свойства воздуха в [8], аргона в [9], углекислого газа в [10]. Температурные зависимости свойств газов вводились в программу в виде таблиц для степеней черноты $\varepsilon(T)$, коэффициентов электропроводности $\sigma(T)$ и теплопроводности $\lambda(T)$ с максимальным значением температуры $T = 20$ кК (для аргона 17 кК) и шагом $\Delta T = 1$ кК.

Результаты расчетов

Вычислительная модель позволяет рассчитать структуру разряда для разных газов при различных значениях силы тока I и радиуса расчетной области R_0 . Из решения уравнений

(1) – (4) определялось распределение температуры и рассчитывались напряженность электрического поля E , удельные и интегральные энергетические характеристики дугового столба. Напряженность электрического поля является важным параметром, характеризующим энергобаланс в разряде, поскольку она определяет величину мощности джоулевой диссипации, компенсирующей теплопроводные и радиационные энергопотери. На рис. 1 и 2 приведено сопоставление вольтамперных характеристик (ВАХ), полученных из экспериментов и с помощью данной математической модели. На рис.1 представлены расчетные и экспериментальные [11] значения E при атмосферном давлении в воздухе (свободно горящая дуга) и углекислом газе (радиус канала 2 см). На рис. 2 для аргона при атмосферном давлении и двух значений радиуса канала (2.5 и 3 мм) сопоставлены данные измерений [12] и расчетов, которые в этом случае были проведены при величине разностного шага 0.1 мм. И эксперимен-

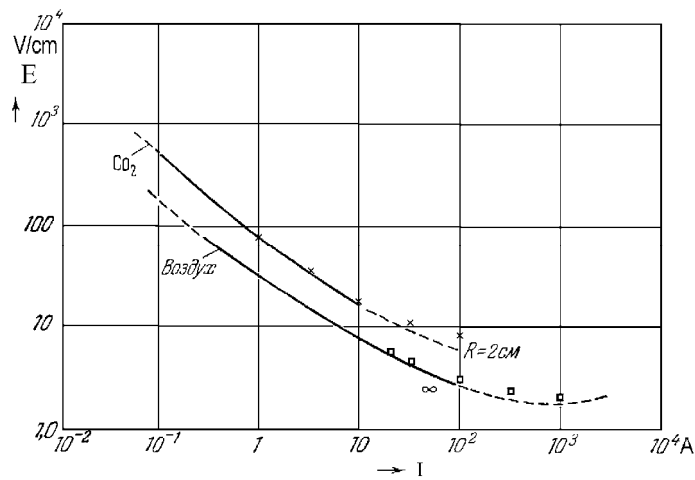


Рис. 1. Экспериментальные ВАХ и расчетные значения E (квадратики для воздуха, крестики для CO_2)

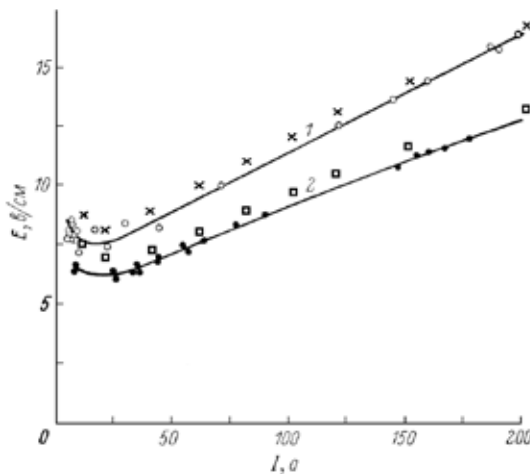


Рис. 2. Экспериментальные ВАХ и расчетные значения E для аргона (кривая 1 и крестики для $R_0 = 2,5$ мм, кривая 2 и квадратики для $R_0 = 3$ мм)

тальные и расчетные данные свидетельствуют о достаточно сильной зависимости величины E от рода газа и параметров разряда.

Для определения границ режимов дугового разряда рассчитывался энергетический баланс разряда в локальных и интегральных величинах. В первом случае сравнивалось соотношение удельных мощностей механизмов излучения q_R , теплопроводности q_T и джоулевой диссипации q_J в центре разряда. Во втором – определялись суммарные по всему объему разряда мощности лучистых энергопотерь Q_R и джоулева тепловыделения Q_J , а также тепловая мощность Q_T , уходящая из разряда за счет механизма теплопроводности через площадь боковой стенки. Следует отметить, что в расчетах с высокой точностью выполнялись балансовые соотношения как интегральные $Q_J = Q_R + Q_T$, так и локальные $q_J = q_R + q_T$ во всех расчетных точках. По удельным и интегральным энергетическим характеристикам рассчитывались отношения $k_L = q_R/q_J$ и $k_I = Q_R/Q_J$, в качестве критериев при определении границ приняты значения $k = 0,1, 0,5$ и $0,9$. При значении $k < 0,1$ влияние излучения в энергобалансе пренебрежимо мало, при $k > 0,9$, наоборот, доминируют радиационные энергопотери. Значение $k = 0,5$ соответствует равенству вкладов теплопроводности и излучения. Из решения уравнений (1)–(4) для указанных значений k определены величины силы тока I^* и максимальной температуры в центре разряда T_{max} .

Результаты расчетов для воздуха при атмосферном давлении приведены на рис. 3 и 4. На рис. 3 для значений $k = 0,1, 0,5$ и $0,9$ отображены зависимости $I^*(R_0)$, каждая из которых является геометрическим местом точек, соответствующих режимам с силой тока I^* в диапазоне значений $R_0 = 5 \div 50$ мм. Сплошные линии 1, 2 и 3 на рис. 3–10 соответствуют значениям $k_I = 0,9, 0,5$ и $0,1$, штриховые линии 4, 5 и 6 относятся к аналогичным значениям k_L . Кривые 2 и 5, для которых выполняются равенства $Q_R = Q_T$ и $q_R = q_T$, делят плоскость $R_0 - I^*$ на две области, выше кривых находятся режимы, в энергобалансе которых вклад излучения больше, ниже – режимы с более сильным влиянием теплопроводности. Выше границ 1 и 4 расположены режимы, в энергобалансе которых доминирует излучение $Q_R \gg Q_T$ и $q_R \gg q_T$, соответственно, теплопро-

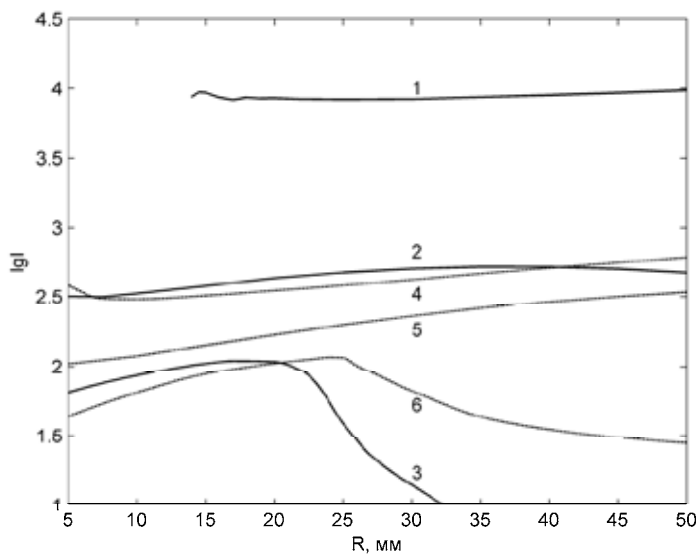


Рис. 3. Зависимости $lg I^*(R_0)$ для воздуха при $p = 0,1$ МПа

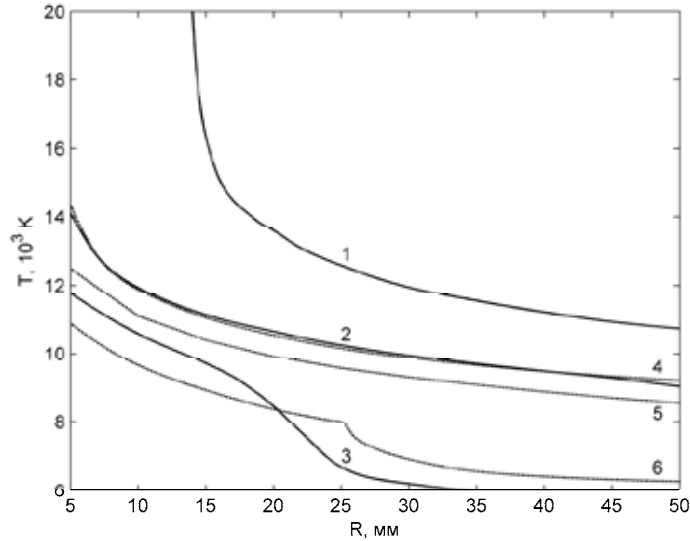


Рис. 4. Зависимости $T_{max}(R_0)$ для воздуха при $p = 0,1$ МПа

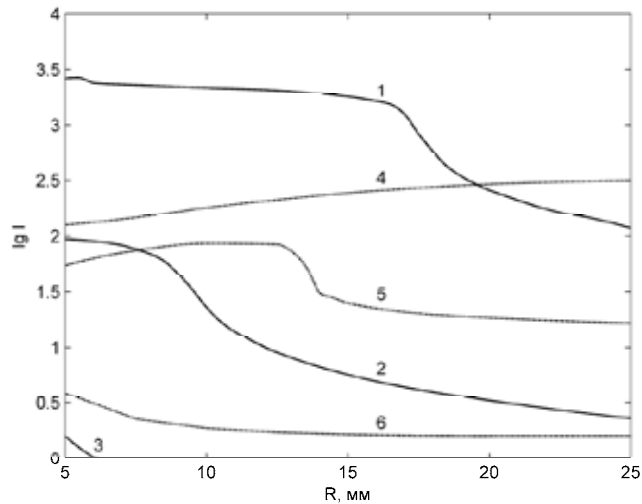


Рис. 5. Зависимости $lg I^*(R_0)$ для воздуха при $p = 1$ МПа

водные режимы, когда $Q_T \gg Q_R$ и $q_T \gg q_R$, находятся ниже кривых 3 и 6. Графики значений максимальной температуры $T_{max}(R_0)$ в центре разряда, соответствующие полученным зависимостям $I^*(R_0)$, приведены на рис. 4. Зависимости $T_{max}(R_0)$ для всех значений k имеют монотонно падающий характер. Явно выраженный излом кривых 6 на рис. 3 и 4 связан с наличием в зависимости $\lambda(T)$ для воздуха локального максимума $\lambda_{max} = 4,2$ Вт/(м×К) при $T = 7$ кК (при $T = 6$ кК и 8 кК величина $\lambda = 2,4$ Вт/(м×К)).

На рис. 5 и 6 приведены зависимости $I^*(R_0)$ и $T_{max}(R_0)$ для воздуха при давлении $p = 1$ МПа. Кривые на графиках построены в диапазоне значений $R_0 = 5 \div 25$ мм, при расчете структуры было установлено, что увеличение давления с $0,1$ МПа до 1 МПа приводит к уменьшению по-

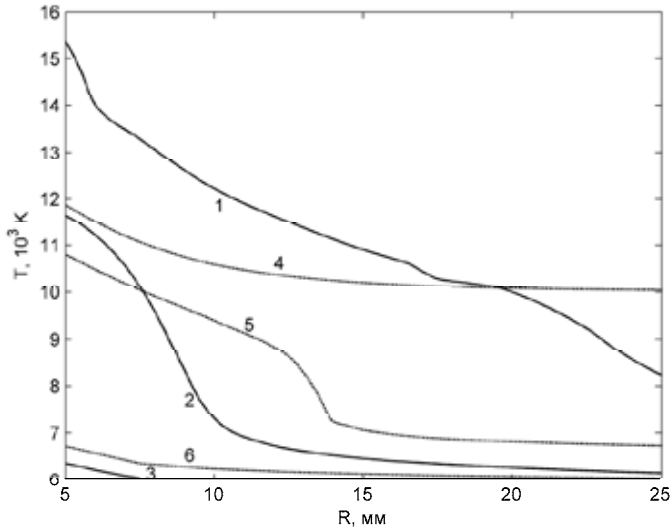


Рис. 6. Зависимости $T_{max}(R_0)$ для воздуха при $p = 1$ МПа

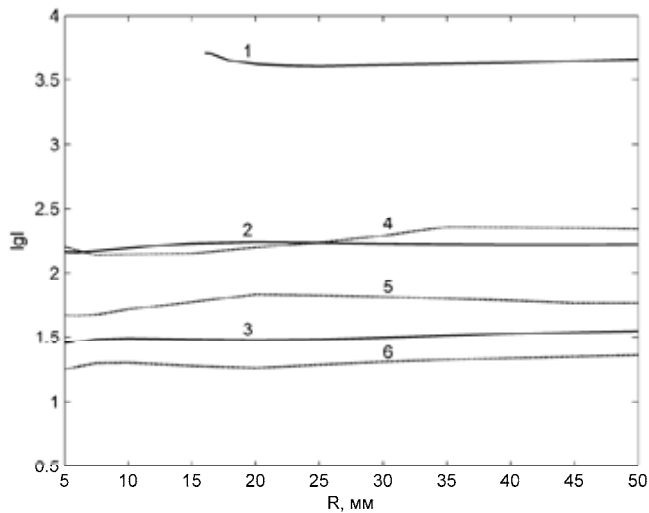


Рис. 7. Зависимости $|gI^*(R_0)$ для аргона

перечного размера разрядного столба примерно в 2 раза. Изменение давления в наибольшей степени влияет на излучательную способность газа, при повышении давления пропорционально растет мощность радиационных энергопотерь, по этой причине переход к радиационному режиму наблюдается при существенно меньших значениях тока и температуры. Изломы на кривых 1 и 5 также являются следствием локальных максимума ($\lambda_{max} = 3,9$ Вт/(м×К) при $T = 8$ кК) и минимума ($\lambda_{min} = 1,7$ Вт/(м×К) $T = 10$ кК) в зависимости $\lambda(T)$ для воздуха при давлении $p = 1$ МПа.

В отличие от молекулярных газов аргон имеет сравнительно невысокую излучательную способность, коэффициент теплопроводности также существенно ниже (особенно для темпе-

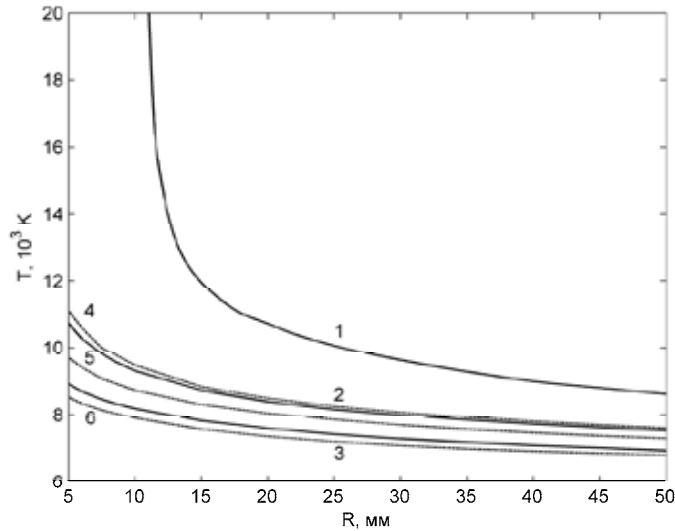


Рис. 8. Зависимости $T_{max}(R_0)$ для аргона

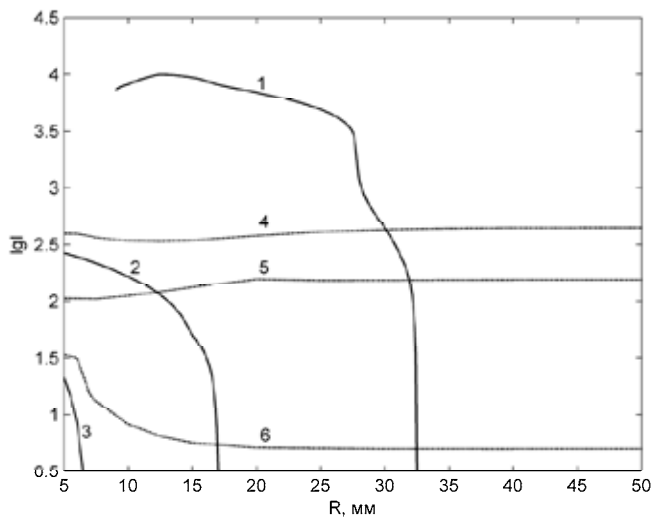


Рис. 9. Зависимости $lgI^*(R_0)$ для углекислого газа

ратур $T < 10$ кК) и зависимость $\lambda(T)$ имеет более ровный характер. Границы режимов для аргона при атмосферном давлении приведены на рис. 7 и 8. Отличительной особенностью графиков (за исключением кривой 1 на рис. 8) является достаточно слабая зависимость от радиуса.

Для углекислого газа следует отметить близкую с воздухом по характеру и значениям зависимость $\lambda(T)$ и существенно более высокие значения коэффициента черноты, коэффициент электропроводности у CO_2 выше при температурах $T < 11$ кК, далее соотношение становится обратным. Зависимости $I^*(R_0)$ и $T_{max}(R_0)$ для углекислого газа при давлении $p = 0,1$ МПа отображены на рис. 9 и 10. К особенностям интегрального энергобаланса для CO_2 можно отнести то, что значениям $R_0 > 32$ мм соответствуют только радиационные режимы.

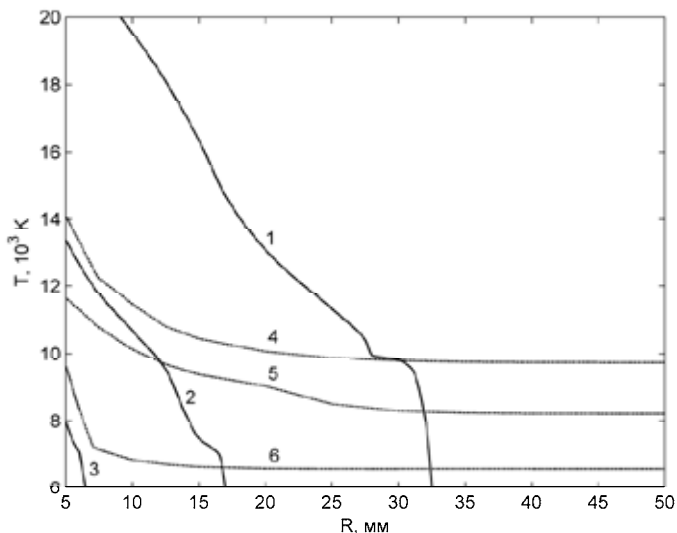


Рис. 10. Зависимости $T_{max}(R_0)$ для углекислого газа

Заключение

Таким образом, рассчитанные зависимости дают возможность оценивать степень влияния энергетических механизмов и величину максимальной температуры в дуговом разряде при различных условиях. В статье приведены два варианта расчета границ радиационного и теплопроводного режимов: в удельных и интегральных величинах. Сложно однозначно определить, какой из них является более предпочтительным для анализа энергобаланса. С одной стороны, соотношение интегральных мощностей наиболее полно отражает энергобаланс всего разряда в целом. С другой – именно соотношение удельной мощности энергетических механизмов в центре разряда устанавливает масштаб температуры, от которого в значительной степени зависят многие, в том числе и интегральные характеристики разряда. По-видимому, в каждом конкретном случае при анализе энергетического баланса следует исходить из цели исследования и специфики поставленной задачи.

Список литературы

- [1] Васильев Е.Н. // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17. № 3. С. 441.
- [2] Васильев Е.Н. // Журнал технической физики. 2012. Т. 82. № 12. С. 47.
- [3] Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. М.: Наука, 1971. 543 с.
- [4] Kenty C. // Journal of Applied Physics. 1939. V.10. № 10. P. 714.
- [5] Ветлуцкий В.Н., Онуфриев А.Т., Севастьяненко В.Г. // Журнал прикладной механики и технической физики. 1965. № 4. С. 71.
- [6] Авилова И.В., Биберман Л.М., Воробьев В.С. и др. Оптические свойства горячего воздуха. М.: Наука, 1970. 320 с.
- [7] Каменицков В.А., Пластинин Ю.А., Николаев В.М., Новицкий Л.А. Радиационные свойства газов при высоких температурах. М.: Машиностроение, 1971. 440 с.
- [8] Соколова И.А. // Журнал прикладной механики и технической физики. 1973. № 2. С. 80.

- [9] *Devoto R.S.* // *Physics of Fluids*. 1967. V. 10, № 2. P. 354.
- [10] *Андрюатис А.В., Соколова И.А.* // *Математическое моделирование*. 1995. Т. 7. № 2. С. 89.
- [11] *Энгель А.* *Ионизованные газы*. М.: Физматгиз, 1959. 332 с.
- [12] *Шейндлин А.Е., Асиновский Э.И., Батулин В.А., Батенин В.М.* // *Журнал технической физики*. 1963. Т. XXXIII. № 10. С. 1169.

Calculation of Division Boards of Radiation and Heat Conduction Regimes of the Arc Discharge

Evgeniy N. Vasil'ev

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

By results of calculation in axisymmetric formulation of structure, specific and integrated capacities of energy mechanisms of the stationary equilibrium arc discharge division boards of the radiation and heat conduction regimes of the discharge burning in air, carbonic gas and argon are defined.

Keywords: the arc discharge, power balance, radiation, heat conduction.
