

Диаграммы состояния стационарного дугового разряда в воздухе

© Е.Н. Васильев

Институт вычислительного моделирования СО РАН,
660036 Красноярск, Россия
e-mail: ven@icm.krasn.ru

(Поступило в Редакцию 11 января 2012 г.)

Из решения уравнения Эленбааса-Хеллера для различных значений силы тока I и радиуса R определены температура, удельные и интегральные мощности энергетических механизмов стационарного равновесного дугового разряда, горящего в цилиндрическом канале в воздухе при давлении 0.1 и 1 МПа. Результаты расчетов приведены в виде диаграмм состояния, предназначенных для оценки основных энергетических характеристик электрических дуг при заданных значениях I и R .

Введение

Дуговые разряды находят все более широкое применение в научных исследованиях и различных технических приложениях. Так, например, в последние годы активно развивается перспективное направление использования разрядов — получение в макроскопических количествах новых углеродных материалов, в частности фуллеренов, нанотрубок и графена [1]. При разработке и использовании электродуговых устройств важна информация о характеристиках разрядной плазмы. Состояние и характеристики плазмы в разряде зависят от множества факторов: геометрических параметров канала и электродов, электродинамических параметров, давления, радиационных и транспортных свойств газа. В некоторых стандартных случаях количество определяющих параметров может быть значительно меньшим. Для столба стационарного равновесного дугового разряда, ограниченно цилиндрической стенкой, к основным параметрам, характеризующим состояние плазмы, относятся радиус трубки R и сила тока I .

Важнейшей характеристикой электродуговой плазмы является температура, от которой зависят переносные свойства и интенсивность взаимодействия с электромагнитным полем. Величина и распределение температуры в разряде зависят от энергетического состояния плазмы и определяются балансом энергетических механизмов: джоулевой диссипации, теплопроводности, излучения и конвекции. Как показывают экспериментальные данные, для разрядов, горящих в трубках, роль конвекции пренебрежимо мала [2]. От соотношения мощностей двух других механизмов энергопотерь зависит как максимальное значение температуры T_{\max} в разряде, так и характер температурного распределения. В радиационном режиме, когда в энергобалансе доминирует излучение, имеющее преимущественно объемный характер, в центральной зоне разряда формируется область с однородным распределением температуры, для теплопроводного режима характерен колоколообразный температурный профиль [3].

В настоящей работе на основе расчета структуры дугового разряда получены зависимости энергетических характеристик, описывающих состояние газоразрядной плазмы в воздухе при давлении 0.1 и 1 МПа. К таким характеристикам относятся интегральные и удельные мощности радиационных и теплопроводных энергопотерь, а также напряженность электрического поля E , определяющая мощность джоулевой диссипации. Соотношения мощностей механизмов теплопроводности и излучения представлены в виде диаграмм в переменных R и $\lg I$, которые дополнены зависимостями $E(R)$ и $T_{\max}(R)$. Такое отображение характеристик разряда позволяет оценить состояние электродуговой плазмы для заданных значений переменных и получить общее представление об энергетическом состоянии плазмы в широком диапазоне значений R и I . Работа является развитием исследования [3], в котором рассмотрены особенности формирования структуры дугового разряда в воздухе при различных условиях и определены границы радиационного режима.

1. Постановка задачи

Распределение температуры в разряде, горящем в цилиндрическом объеме и имеющем осевую симметрию, описывается 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, λ — коэффициент теплопроводности газа, q_J — мощность джоулевой диссипации, q_R — объемная мощность радиационных энергопотерь. 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

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

Величина мощности джоулевой диссипации определяется из выражения $q_J = \sigma E^2$. Напряженность электрического поля E зависит от силы тока и распределения электропроводности $\sigma(r)$ по радиусу

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

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 [3].

Решение краевой задачи (1)–(4) проводилось с помощью конечноразностного алгоритма, величина пространственного шага в расчетах принималась равной 0.5 мм. Температурные зависимости свойств газа вводились в программу в виде таблиц для степеней черноты $\varepsilon(T)$ [4], коэффициентов электропроводности $\sigma(T)$ [5] и теплопроводности $\lambda(T)$ [5] с максимальным значением температуры $T = 2 \cdot 10^4$ К и шагом $\Delta T = 10^3$ К. Решение уравнений (1)–(4) для заданных значений R и I позволяет определить температурный профиль $T(r)$ и рассчитать энергетические характеристики разряда.

2. Анализ результатов расчета

Для подтверждения адекватности вычислительной модели было проведено сравнение расчетных данных с экспериментальными результатами. На рис. 1 приведена вольт-амперная характеристика (ВАХ), относящаяся к свободно горящему разряду в воздухе [6], расчетные значения отмечены квадратиками. При вычислениях граница расчетной области задавалась достаточно удаленной ($R = 100$ мм), чтобы свести к минимуму ее влияние на характеристики разрядного столба. На рис. 2 представлены экспериментальная ВАХ [7] и расчетные значения для дуги при атмосферном давлении в радиусе канала 2.5 мм в азоте, имеющем очень близкие к воздуху теплофизические свойства.

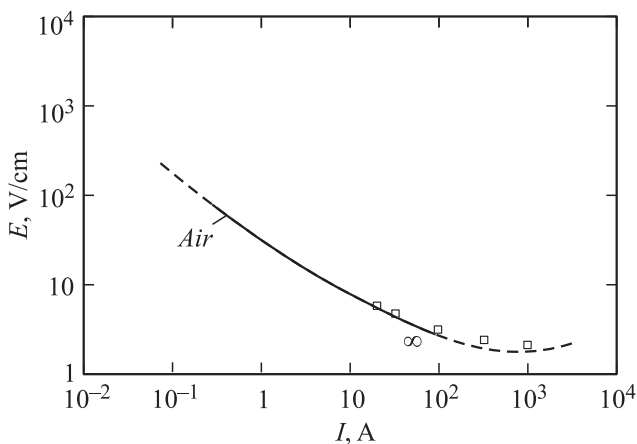


Рис. 1. Сравнение ВАХ дугового разряда и данных расчета для воздуха.

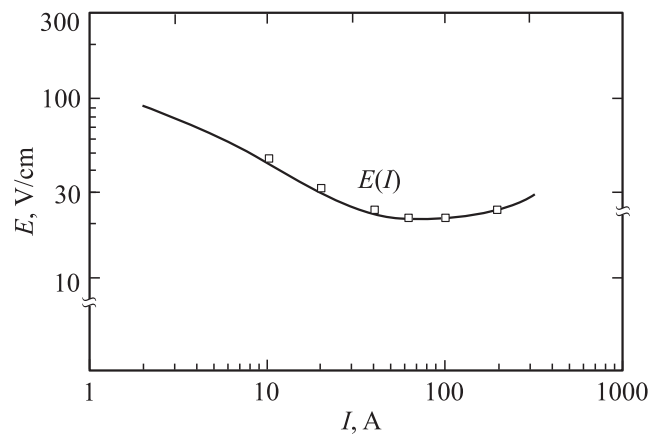


Рис. 2. Сравнение ВАХ и данных расчета для азота.

Для построения диаграмм состояния проведены серии расчетов структуры дугового разряда и его энергетических характеристик. При этом решалась задача (1)–(4) для различных значений R и I и по полученному температурному профилю $T(r)$ рассчитывался энергетический баланс разряда как в локальных, так и интегральных величинах. В первом случае определялись удельные мощности механизмов излучения q_R , теплопроводности q_T и джоулевой диссипации q_J в центре разряда, во втором — суммарные по всему объему разряда мощности лучистых энергопотерь Q_R , джоулева тепловыделения Q_J , а также тепловая мощность Q_T , которая уносится из разряда теплопроводностью 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 интегральным энергетическим характеристикам рассчитывались отношения $k_L = q_R/q_J$ и $k_I = Q_R/Q_J$, на диаграммах отображены изолинии для значений $k = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7$ и 0.9 .

Результаты расчетов удельных характеристик разряда при давлении 0.1 МПа приведены на рис. 3. На диаграмме состояния (рис. 3, а) представлены изолинии энергетических соотношений k_L в плоскости $R - \lg I$. На рисунке кривая 3, отвечающая отношению $q_R = q_T$, делит плоскость на две области, выше кривой находятся режимы, в энергобалансе которых вклад излучения больше, ниже — режимы с более сильным влиянием теплопроводности. Соответственно выше кривой 5 расположены режимы, в энергетическом балансе которых доминирует излучение $q_R \gg q_T$, а под кривой 1 находятся теплопроводные режимы, когда $q_T \gg q_R$. Следует отметить, что кривые 2–5 имеют минимум в диапазоне $R = 3–10$ мм, при меньших значениях радиуса у них формируется восходящая ветвь, обусловленная нелинейным ростом мощности теплопроводностного механизма при уменьшении радиуса ($\sim 1/R^2$). Максимум на кривой 1 вызван наличием в зависимости $\lambda(T)$ локального максимума $\lambda_{\max} = 4.2$ Вт/(м·К) при $T = 7 \cdot 10^3$ К (при $T = 6 \cdot 10^3$ и $8 \cdot 10^3$ К величина $\lambda = 2.4$ Вт/(м·К)).

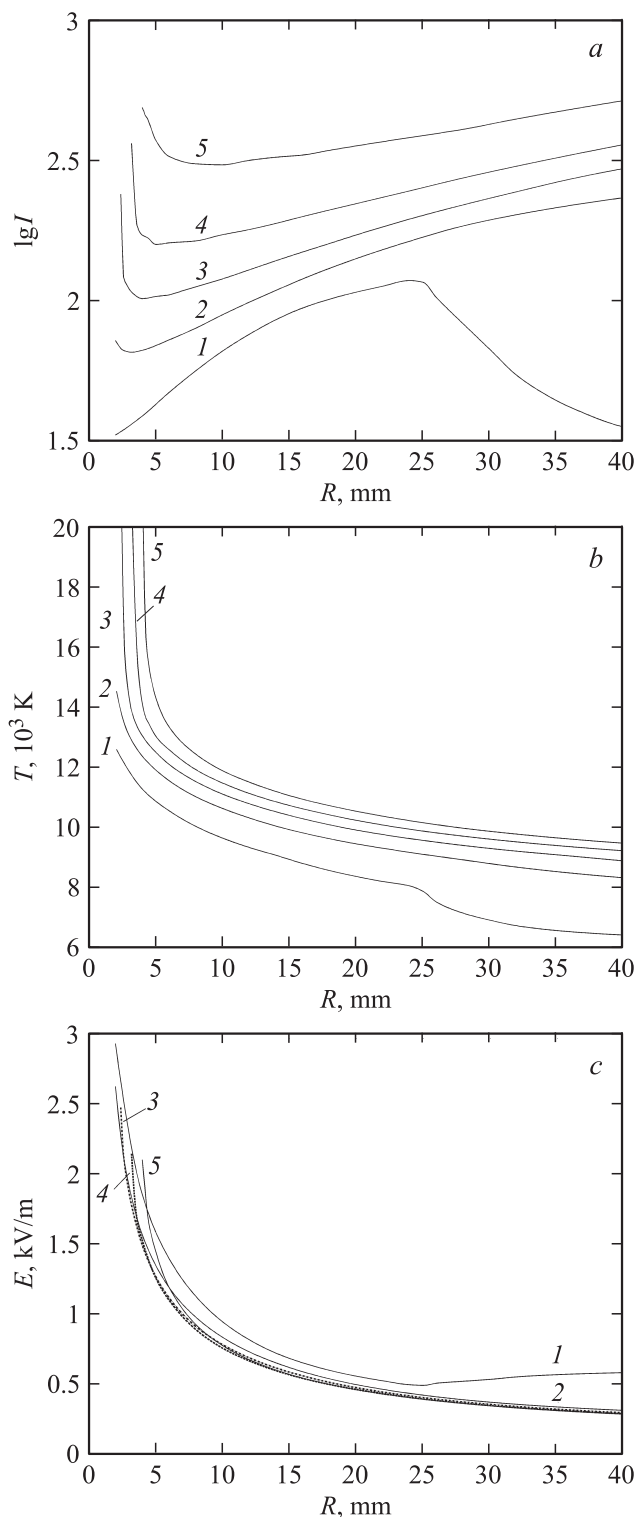


Рис. 3. *a* — зависимости $I(R)$, соответствующие значениям $k_L = 0.1$ (1), 0.3 (2), 0.5 (3), 0.7 (4), 0.9 (5) для $p = 0.1$ МПа; *b* — зависимости $T(R)$ для $k_L = 0.1$ (1), 0.3 (2), 0.5 (3), 0.7 (4), 0.9 (5), $p = 0.1$ МПа; *c* — зависимости $E(R)$ для $k_L = 0.1$ (1), 0.3 (2), 0.5 (3), 0.7 (4), 0.9 (5), $p = 0.1$ МПа.

Дополнительно к диаграмме состояния для совокупности режимов, соответствующих изолиниям, проведены величины максимальной температуры в центре разряда

T_{\max} (рис. 3, *b*) и напряженности электрического поля E (рис. 3, *c*). Данные в таблицах степеней черноты [4] приведены для температурного диапазона до $2 \cdot 10^4$ К, поэтому часть графиков ограничена этим значением. Зависимости $T_{\max}(R)$ для всех k_L имеют монотонно падающий характер, наклон кривых значительно уменьшается при увеличении R . Кривые $E(R)$ на большей части диапазона расположены достаточно близко друг к другу, поэтому для улучшения идентификации кривые 3 и 4 на рис. 3, *c* проведены пунктирными линиями.

Характеристики интегрального энергобаланса при давлении 0.1 МПа приведены на рис. 4. На рис. 4, *a* взаимное расположение областей, относящихся к теплопроводному и радиационному режимам, такое же, как и на диаграмме для удельных характеристик (рис. 3, *a*), но при этом переход к радиационному режиму происходит при существенно больших значениях I . Это связано с тем, что последовательное увеличение силы тока приводит к максимальному росту температуры на оси разряда, поэтому вклад излучения сначала начинает доминировать локально в центре, затем в прилегающих областях, а в конечном итоге в интегральном энергобалансе всего разряда. На рис. 4, *c* пунктирными линиями проведены кривые 1 и 2.

Данные по удельному энергобалансу при давлении $p = 1$ МПа приведены на рис. 5. При повышении давления пропорционально растет излучательная способность газа, поэтому переход к радиационному режиму наблюдается при меньших значениях силы тока и температуры (рис. 5, *a* и *b*). Наоборот, величина напряженности электрического поля стала существенно выше (рис. 5, *c*), что обусловлено возросшей мощностью энергопотерь. Экстремумы на кривых 1–3 (рис. 5, *a* и *c*) являются следствием локальных максимума ($\lambda_{\max} = 3.9 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$) при $T = 8 \cdot 10^3 \text{ K}$ и минимума ($\lambda_{\min} = 1.7 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$) при $T = 10^4 \text{ K}$ в зависимости $\lambda(T)$ при давлении $p = 1$ МПа.

На рис. 6 приведены интегральные энергетические характеристики разряда при давлении $p = 1$ МПа. Из сравнения аналогичных графиков на рис. 5 и 6 видно, что зависимости удельных и интегральных характеристик существенно отличаются как по численным значениям, так и по форме кривых.

Представленные диаграммы энергетического состояния газоразрядной плазмы в переменных R и I позволяют установить соотношение мощностей радиационных и теплопроводных энергопотерь k (рис. 3, *a*, 4, *a*, 5, *a* и 6, *a*), значение максимальной температуры T_{\max} (рис. 3, *b*, 4, *b*, 5, *b* и 6, *b*), напряженности электрического поля (рис. 3, *c*, 4, *c*, 5, *c* и 6, *c*). Дополнительно в расчете удельных характеристик по значению T_{\max} (рис. 3, *b* и 5, *b*) с учетом зависимости коэффициента электропроводности $\sigma(T)$ рассчитываются величина σ_{\max} , мощности джоулевой диссипации $\sigma_{\max} E^2$, радиационных $k_L \sigma_{\max} E^2$ и теплопроводных энергопотерь $(1 - k_L) \sigma_{\max} E^2$ на оси разряда. При расчете интеграль-

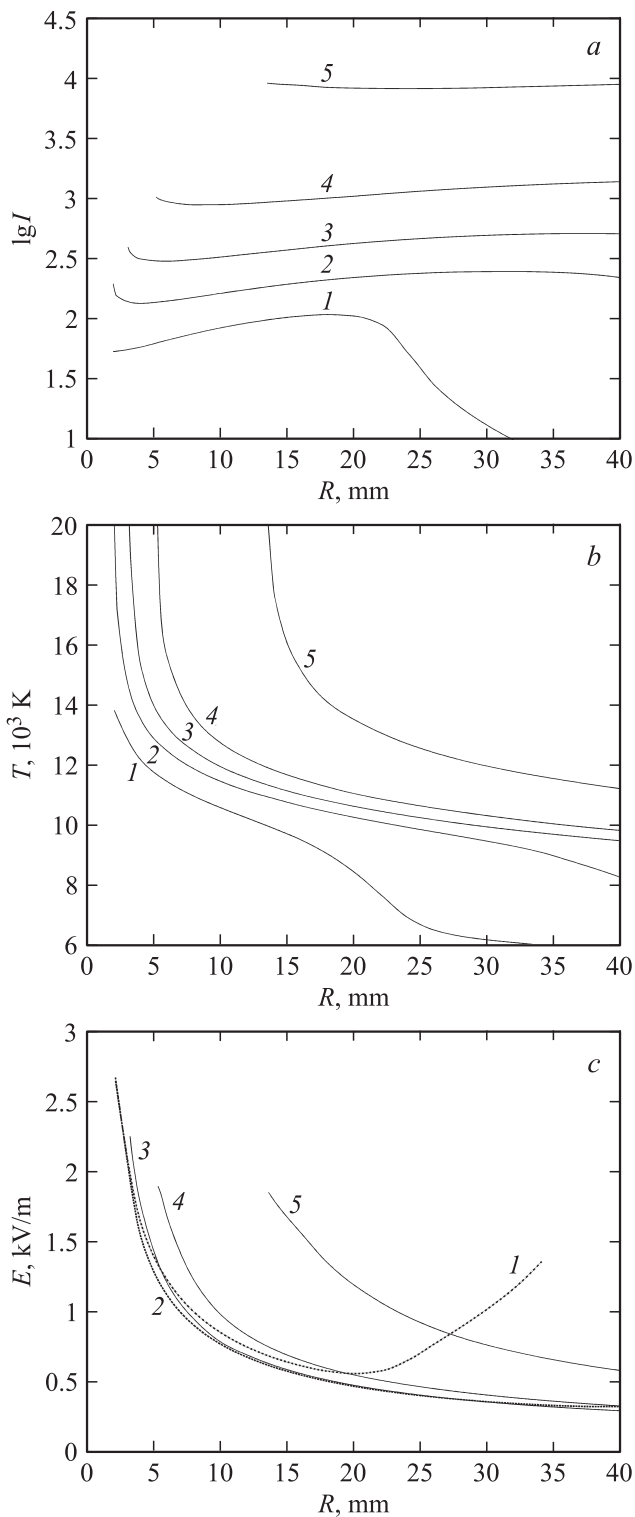


Рис. 4. *a* — зависимости $I(R)$ для $k_I = 0.1$ (1), 0.3 (2), 0.5 (3), 0.7 (4), 0.9 (5), $p = 0.1$ МПа; *b* — зависимости $T(R)$ для $k_I = 0.1$ (1), 0.3 (2), 0.5 (3), 0.7 (4), 0.9 (5), $p = 0.1$ МПа; *c* — зависимости $E(R)$ для $k_I = 0.1$ (1), 0.3 (2), 0.5 (3), 0.7 (4), 0.9 (5), $p = 0.1$ МПа.

ных характеристик из рис. 4, *c* и 6, *c* сначала определяется значение напряженности электрического поля E , затем вычисляются значения мощностей джоулева теп-

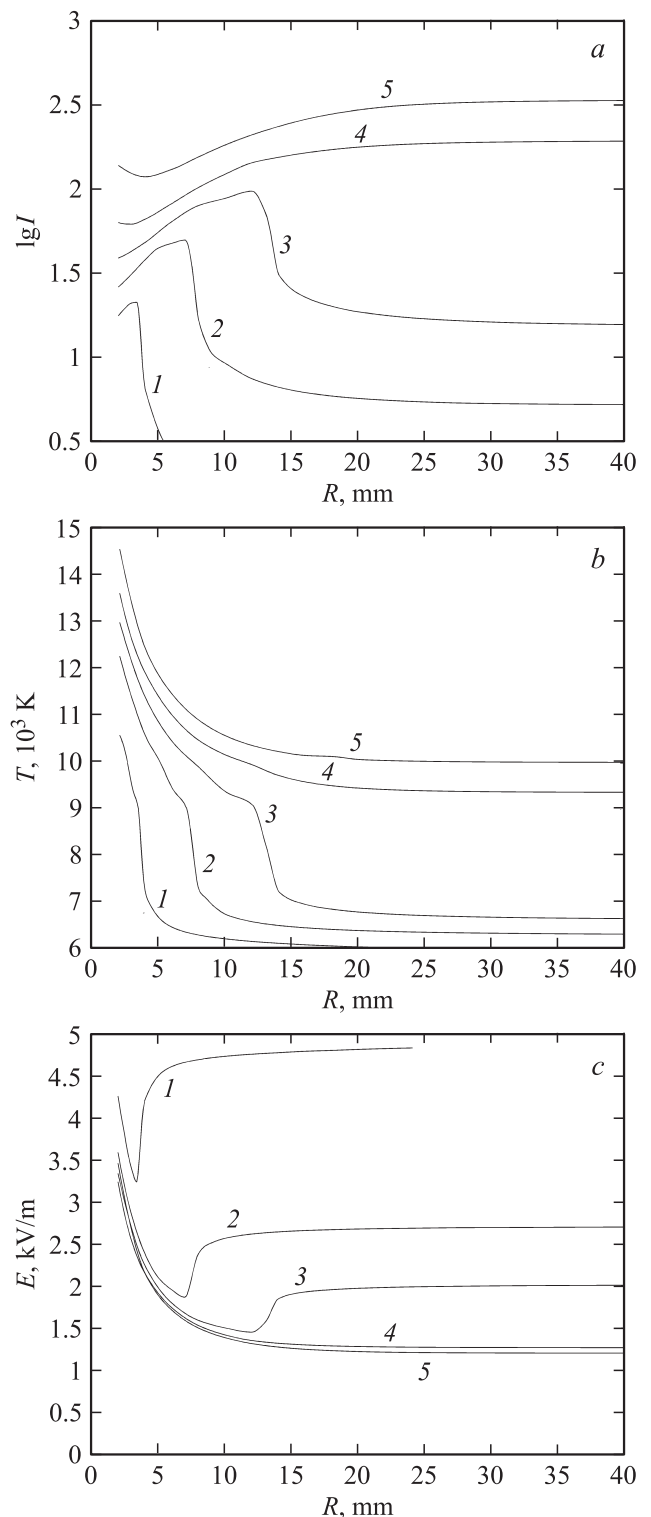


Рис. 5. *a* — зависимости $I(R)$ для $k_L = 0.1$ (1), 0.3 (2), 0.5 (3), 0.7 (4), 0.9 (5), $p = 1$ МПа; *b* — зависимости $T(R)$ для $k_L = 0.1$ (1), 0.3 (2), 0.5 (3), 0.7 (4), 0.9 (5), $p = 1$ МПа; *c* — зависимости $E(R)$ для $k_L = 0.1$ (1), 0.3 (2), 0.5 (3), 0.7 (4), 0.9 (5), $p = 1$ МПа.

ловыделения IE , радиационных $k_I IE$ и теплопроводных $(1 - k_I)/E$ энергопотерь на единицу длины дугового столба. Таким образом, с помощью диаграмм состояния

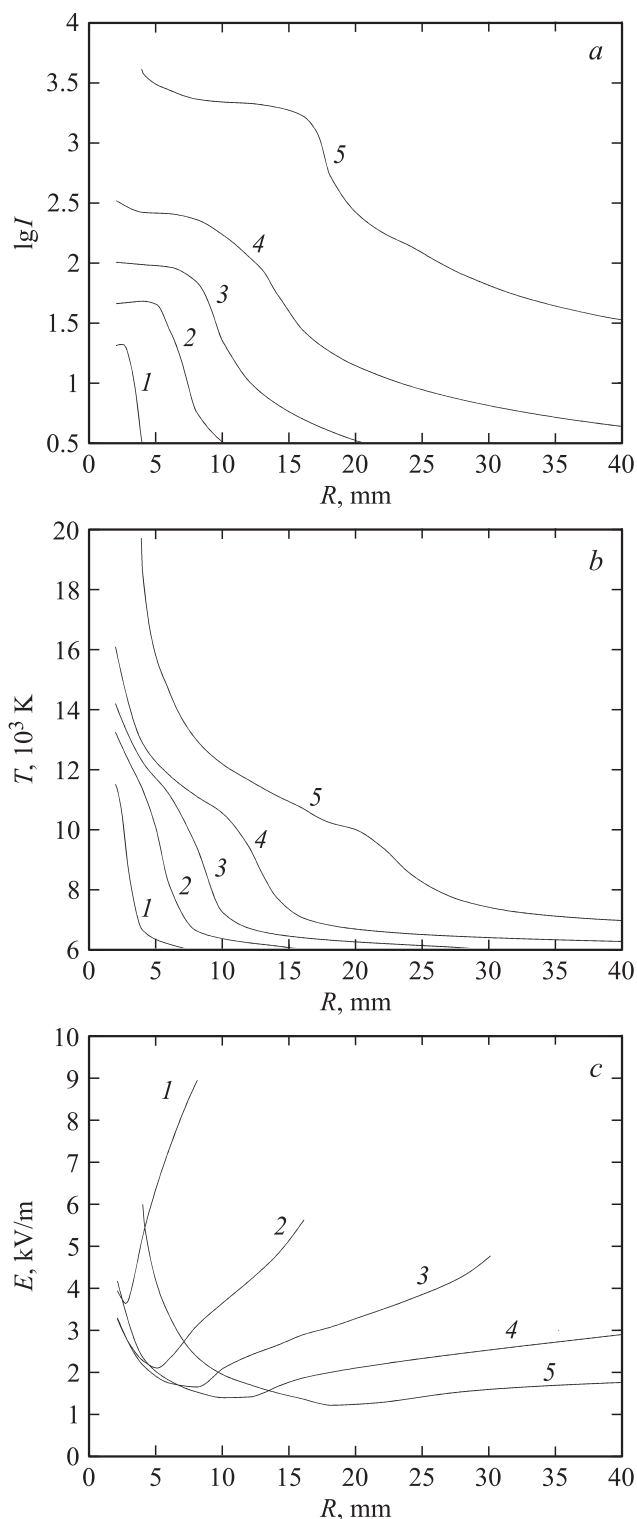


Рис. 6. *a* — зависимости $I(R)$ для $k_I = 0.1$ (1), 0.3 (2), 0.5 (3), 0.7 (4), 0.9 (5), $p = 1$ МПа; *b* — зависимости $T(R)$ для $k_I = 0.1$ (1), 0.3 (2), 0.5 (3), 0.7 (4), 0.9 (5), $p = 1$ МПа; *c* — зависимости $E(R)$ для $k_I = 0.1$ (1), 0.3 (2), 0.5 (3), 0.7 (4), 0.9 (5), $p = 1$ МПа.

определяются основные энергетические характеристики стационарной электрической дуги, горящей в цилиндрической трубке.

Диаграммы состояния, по-видимому, могут быть также использованы для оценки энергетических характеристик разрядов, свободно горящих или обдуваемых газовыми потоками, имеющими малую скорость (менее 10 м/с), когда влиянием конвекции можно пренебречь. В работе [3] был сделан вывод, что при больших значениях R стенка практически не влияет на распределение температуры в центральной токопроводящей зоне разряда, именно по этой причине кривые на графиках (рис. 3–6) становятся все более пологими при увеличении радиуса трубки. Следовательно, значения на диаграммах при максимальном значении R могут быть использованы для оценки характеристик свободно горящего разряда. В случае разряда, горящего в газовом потоке, электропроводящий столб непосредственно граничит с холодным обтекающим газом, и параметры газоразрядной плазмы можно оценить, если известен поперечный размер разряда (например, по данным фотоили видеосъемки).

Заключение

Представленные на диаграммах состояния зависимости дают возможность оценивать степень влияния и мощность энергетических механизмов, величину максимальной температуры в стационарном дуговом разряде, горящем в воздухе при различных условиях. В настоящей работе приведены два варианта расчета энергетических характеристик: в удельных и интегральных величинах. Соотношение интегральных мощностей наиболее полно отражает энергобаланс всего разряда в целом, а соотношение удельных мощностей энергетических механизмов в центре разряда устанавливает масштаб температуры, от которого в значительной степени зависят многие, в том числе и интегральные характеристики разряда. При анализе энергетического баланса разряда они могут быть использованы по отдельности или одновременно в зависимости от цели исследования и специфики поставленной задачи.

Список литературы

- [1] Subrahmanyam K.S., Panchakarla L.S., Govindaraj A., Rao C.N.R. // J. Phys. Chem. C. 2009. Vol. 113. N 11. P. 4257–4259.
- [2] Kenty C. // J. Appl. Phys. 1939. Vol. 10. N 10. P. 714.
- [3] Васильев Е.Н. // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17. № 3. С. 441–449.
- [4] Авилова И.В., Биберман Л.М., Воробьев В.С. и др. // Оптические свойства горячего воздуха. М.: Наука, 1970. 320 с.
- [5] Соколова И.А. // ПМТФ. 1973. № 2. С. 80–90.
- [6] Энгель Ф. Ионизованные газы. М.: Физматгиз, 1959. 332 с.
- [7] Maescker H. // Z. Fur Phys. 1060. Vol. 158. N 4. P. 392–404.