

## Диаграммы состояния стационарного дугового разряда в аргоне и углекислом газе

© Е.Н. Васильев

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

(Поступило в Редакцию 9 января 2013 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 при атмосферном давлении в аргоне и углекислом газе. Результаты расчетов представлены в виде диаграмм состояния, предназначенных для оценки основных энергетических характеристик электрических дуг при заданных значениях  $I$  и  $R$ . Для углекислого газа выявлен эффект экранирования механизма теплопроводности на границе разряда, обусловленный особенностями температурной зависимости радиационных свойств.

### Введение

В работе [1] были рассмотрены особенности формирования структуры стационарного равновесного дугового разряда в воздухе при различных условиях и определены границы радиационного режима. В дальнейших исследованиях [2] получены расчетные зависимости энергетических характеристик, описывающих состояние газоразрядной плазмы в воздухе при давлении 0.1 и 1 МПа. Вычисления были проведены в широком диапазоне значений радиуса трубки  $R$  и силы тока  $I$  для столба дугового разряда, ограниченного цилиндрической стенкой. Результаты расчетов представлены в виде диаграмм состояния, которые позволяют оценивать такие характеристики газоразрядной плазмы, как температуру, напряженность электрического поля, мощность джоулевой диссипации, интегральные и удельные мощности радиационных и теплопроводных энергопотерь. В настоящей работе, являющейся продолжением [2], приведены диаграммы состояния для дугового разряда в аргоне и углекислом газе при атмосферном давлении.

### 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,  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности газа,  $q_J$  — мощность джоулевой диссипации,  $q_R$  — объемная мощность радиационных энергопотерь. Уравнение (1) дополняется граничными условиями в центре разрядной области и на внешней

границе

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

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:

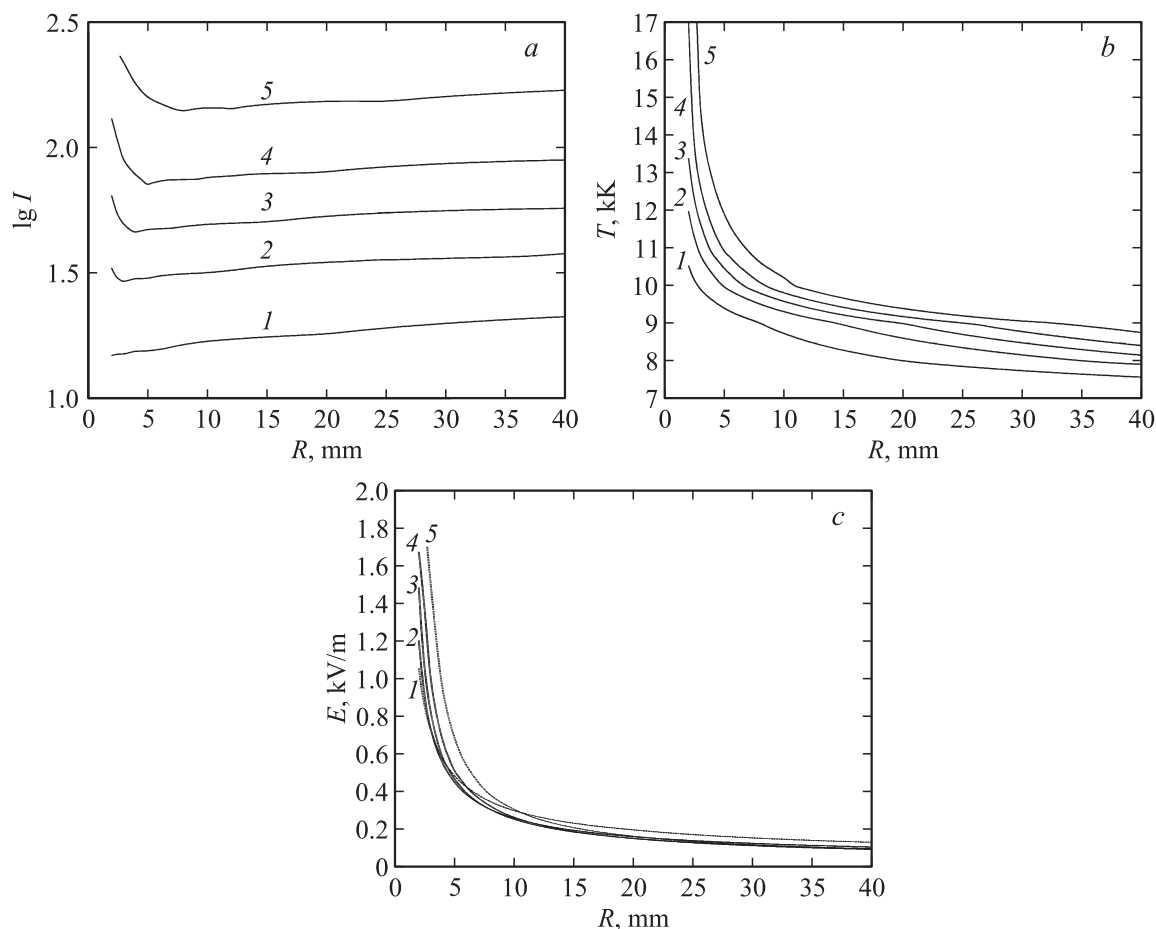
$$E = I/2\pi \int_0^R \sigma(r) r dr. \quad (3)$$

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 [1].

Решение краевой задачи (1)–(3) проводилось численно с учетом температурных зависимостей свойств газов, которые вводились в программу в виде таблиц для степеней черноты  $\varepsilon(T)$ , коэффициентов электропроводности  $\sigma(T)$  и теплопроводности  $\lambda(T)$ . Для аргона использованы данные  $\varepsilon$  из [3],  $\sigma$  и  $\lambda$  из [4], для углекислого газа —  $\varepsilon$  из [5],  $\sigma$  и  $\lambda$  из [6]. Решение уравнений (1)–(3) для заданных значений  $R$  и  $I$  позволяет определить температурный профиль  $T(r)$  и рассчитать удельные и интегральные энергетические характеристики разряда. Величина пространственного шага в расчетах принималась равной 0.5 мм.

### Анализ результатов расчета

Диаграммы состояния построены на основе расчета температурного распределения и энергетических характеристик осесимметричного дугового разряда. Для этого решалась задача (1)–(3) для различных значений  $R$  и  $I$ , и по полученному температурному профилю  $T(r)$  рассчитывался энергетический баланс разряда в локальных



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

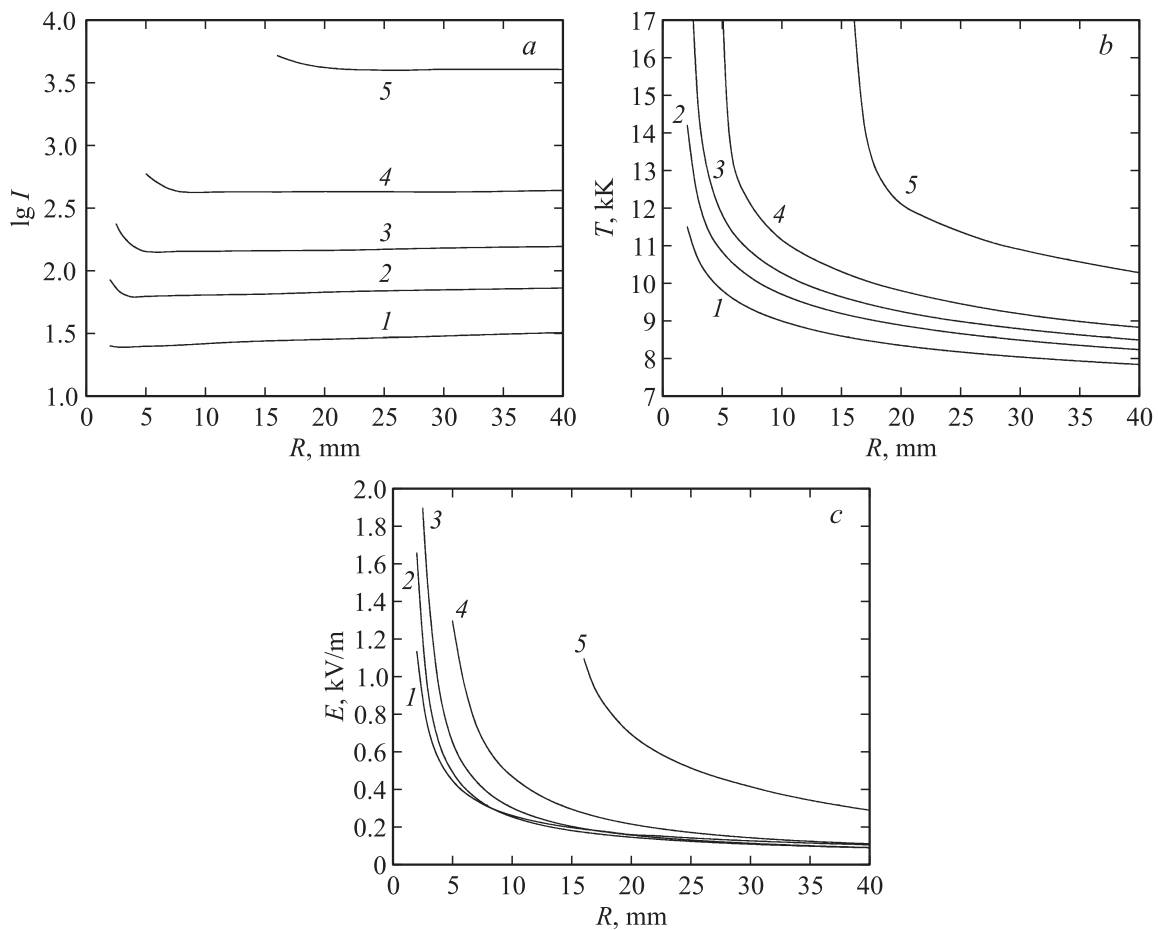
и интегральных величинах. В первом случае определялись удельные мощности механизмов излучения  $q_R$ , теплопроводности  $q_T$  и джоулевой диссипации  $q_J$  в центре разряда, во втором — суммарные по всему объему разряда мощности лучистых энергопотерь  $Q_R$ , джоулева тепловыделения  $Q_J$ , а также тепловая мощность  $Q_T$ , которая уносится из разряда теплопроводностью через площадь боковой стенки. По удельным и 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 в аргоне приведены на рис. 1. Изолинии энергетических соотношений  $k_L$  для дугового разряда в аргоне представлены в плоскости  $R - \lg I$  (рис. 1, *a*). Графики позволяют оценить относительный вклад излучения и теплопроводности в энергобалансе разряда. На рис. 1, *a* кривая 3, отвечающая отношению  $q_R = q_T$ , делит плоскость на две области, в верхней области находятся режимы, в энергобалансе которых вклад излучения больше, в нижней — 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  $q_T \gg q_R$ .

Важными характеристиками состояния газоразрядной плазмы являются температура и напряженность электрического поля. Зависимости максимальной температуры в центре разряда  $T_{\max}(R)$  и напряженности электрического поля  $E(R)$  приведены для совокупности режимов, соответствующих изолиниям энергетических соотношений (рис. 1, *b* и *c*). Кривые  $E(R)$  расположены достаточно близко друг к другу, для улучшения их идентификации кривые 1 и 5 на рис. 1, *c* проведены пунктирными линиями. Данные в таблицах степеней черноты [3] приведены для температурного диапазона до  $1.7 \cdot 10^4$  К, поэтому зависимости на графиках ограничены этим значением.

Сравнение диаграмм состояния, приведенных на рис. 1, с аналогичными диаграммами для воздуха [2] показывает, что изолинии энергетических соотношений для аргона расположены ниже, т.е. рост влияния излучения в энергобалансе разряда наблюдается при



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

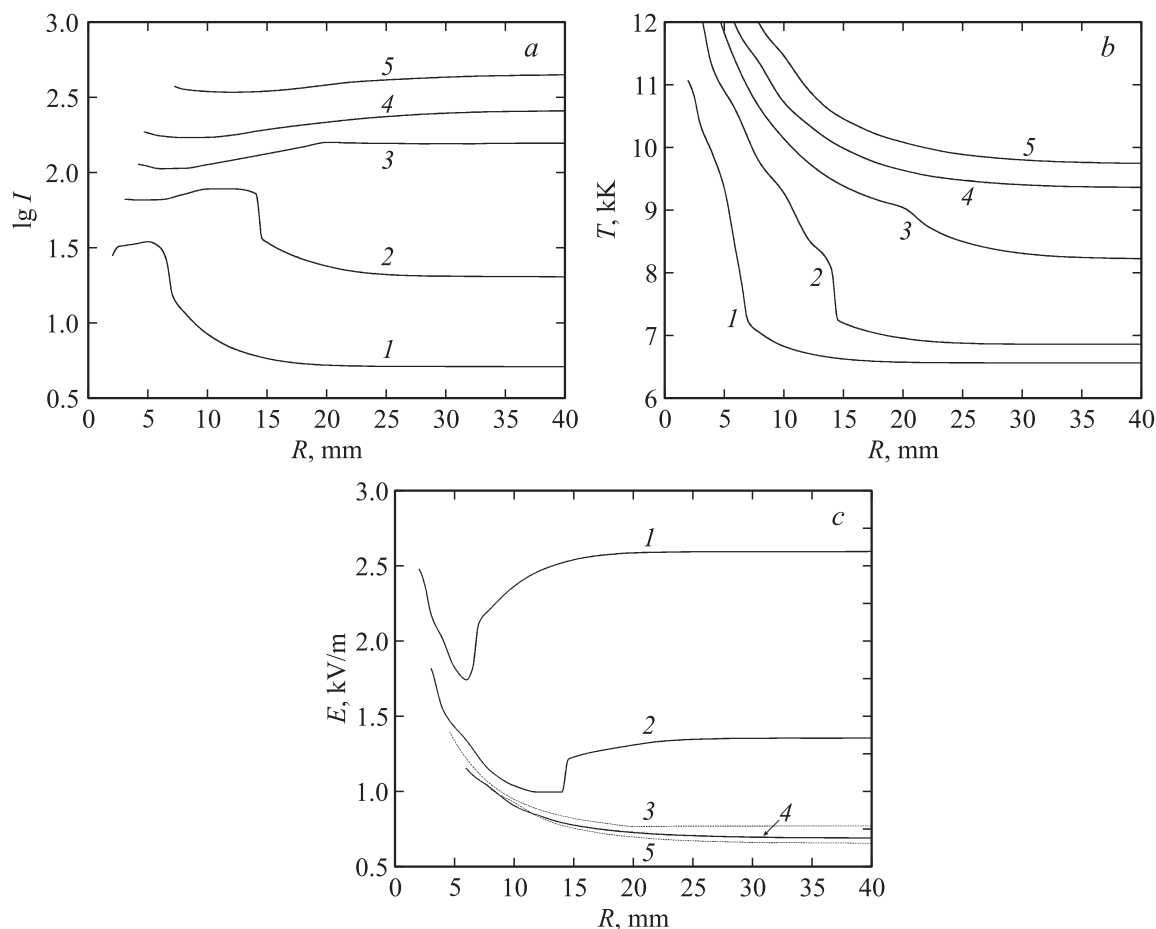
меньших значениях силы тока. Это вызвано тем, что для аргона величина коэффициентов теплопроводности существенно ниже, чем у воздуха (особенно для температур  $T < 10^4$  К). Излучательная способность аргона также меньше, чем у воздуха, что в итоге обуславливает меньшую суммарную мощность радиационных и теплопроводных энергопотерь. Следовательно, для их компенсации требуются меньшие значения джоулевой диссипации и напряженности электрического поля, уровень расположения кривых  $E(R)$  для аргона примерно вдвое ниже, чем для воздуха.

Характеристики интегрального энергобаланса разряда в аргоне приведены на рис. 2. На рис. 2, *a* взаимное расположение областей, относящихся к теплопроводному и радиационному режимам, такое же, как и на диаграмме для удельных характеристик (рис. 1, *a*), но в случае интегральных характеристик переход к радиационному режиму происходит при существенно больших значениях  $I$ . Это обусловлено тем, что последовательное увеличение силы тока приводит к наибольшему росту температуры на оси разряда, поэтому вклад излучения сначала начинает доминировать локально в центре, затем в прилегающих областях, а в конечном итоге в ин-

тегральном энергобалансе всего разряда. Особенностью изолиний интегральных энергетических соотношений для аргона является их слабая зависимость от радиуса.

Для углекислого газа следует отметить близкие с воздухом по характеру и значениям зависимости  $\lambda(T)$  и  $\sigma(T)$ , но значительно более высокие значения коэффициента черноты, особенно в диапазоне температур  $10^3 - 2 \cdot 10^3$  К. Характеристики удельного и интегрального энергобаланса дугового разряда в  $\text{CO}_2$  представлены на рис. 3 и 4. Кривые на рисунках имеют существенно более сложный характер по сравнению с аргонем, вызванный, прежде всего, наличием экстремумов в зависимостях  $\lambda(T)$  и  $\varepsilon(T)$ . Данные в таблицах степеней черноты  $\text{CO}_2$  [5] приведены до значений температуры  $1.2 \cdot 10^4$  К, поэтому зависимости на графиках ограничены этой величиной.

Сравнивая удельные и интегральные характеристики, приведенные на рис. 3, *a* и 4, *a*, следует отметить следующую особенность. При малых значениях  $R$  изолинии интегрального энергобаланса расположены выше соответствующих изолиний удельных характеристик. Но при увеличении  $R$  изолинии интегрального энергобаланса резко снижаются, и для значений  $R > 33$  мм возможны

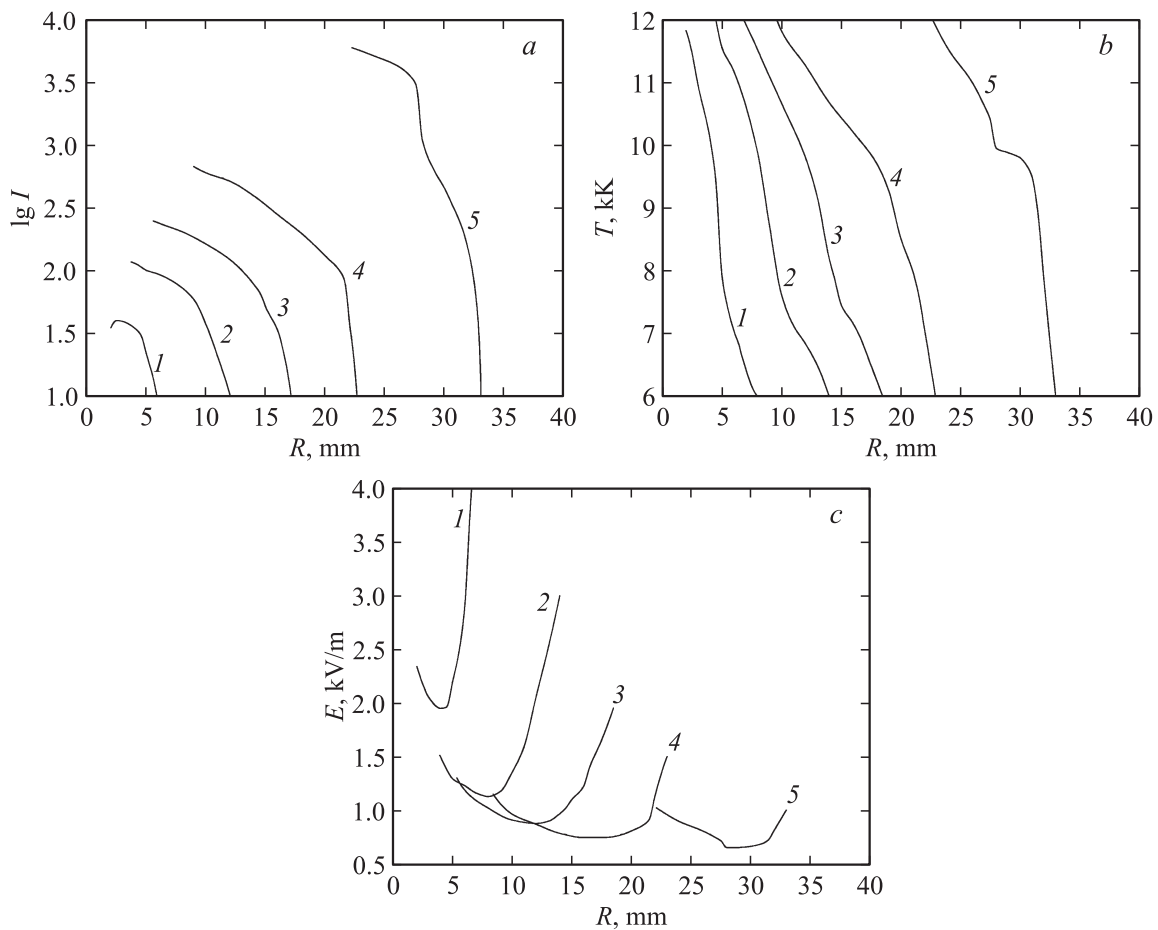


**Рис. 3.** *a* — зависимости  $I(R)$  для  $k_L = 0.1$  (1), 0.3 (2), 0.5 (3), 0.7 (4), 0.9 (5) в углекислом газе; *b* — зависимости  $T(R)$  для  $k_L = 0.1$  (1), 0.3 (2), 0.5 (3), 0.7 (4), 0.9 (5) в углекислом газе; *c* — зависимости  $E(R)$  для  $k_L$  (1), 0.3 (2), 0.5 (3), 0.7 (4), 0.9 (5) в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

только радиационные режимы. На первый взгляд это снижение находится в противоречии с расположением изолиний энергобаланса в удельных величинах, которые в этом диапазоне  $R$  находятся на примерно постоянном уровне.

Для выяснения причины такого качественного несоответствия поведения локальных и интегральных характеристик рассмотрим приведенные на рис. 5 распределения температуры  $T(r)$  (кривая 1) и удельных мощностей энергетических механизмов  $q_J(r)$ ,  $q_R(r)$  и  $q_T(r)$  (кривые 2, 3 и 4) при значениях  $R = 40$  mm и  $I = 150$  A, как следует из рис. 3, *a*, при этих параметрах в центре разряда выполняется соотношение  $q_R \approx q_T$ . Из рис. 5 видно, что при удалении от оси разряда мощность стока энергии за счет теплопроводности быстро падает и при значении  $r \approx 10$  mm меняет знак. В зоне разряда с  $r > 10$  mm действует фактически только один механизм энергопотерь — излучение. При значении  $r > 15$  mm температура в разряде падает ниже  $6 \cdot 10^3$  K, здесь газ становится практически неэлектропроводным, и мощность джоулевой диссипации стремится к нулю. В этой периферийной части разряда следует выделить

слой ( $20 \text{ mm} < r < 35 \text{ mm}$ ), в котором наблюдается рост мощности радиационных энергопотерь, несмотря на уменьшение температуры газа с  $4 \cdot 10^3$  до  $2 \cdot 10^3$  K и ниже. Этот рост обусловлен резким увеличением коэффициента черноты  $\text{CO}_2$  (с  $3.3 \cdot 10^{-4}$  при  $4 \cdot 10^3$  K до  $3.7 \cdot 10^{-2}$  при  $2 \cdot 10^3$  K), превосходящим темп снижения величины множителя  $T^4$  в законе теплового излучения Стефана–Больцмана. По сравнению с центром разряда величина удельной мощности излучения  $q_R$  здесь заметно ниже, но объем этого слоя, пропорциональный  $r^2$ , достаточен для того, чтобы в данном случае обеспечить радиационный унос всей тепловой энергии, доставляемой сюда теплопроводностью из высокотемпературной зоны разряда. В итоге для канала с  $R \geq 40$  mm вся выделившаяся за счет джоулевой диссипации энергия выходит из объема разряда в виде излучения. Таким образом, периферийный слой газа с высоким значением степени черноты фактически экранирует центральную высокотемпературную зону разряда от теплопроводного теплообмена с окружающим холодным газом и стенкой и тем самым способствует пространственной локализации столба разряда. Такой эффект экранирования



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

характерен прежде всего для  $\text{CO}_2$  как представителя трехатомных газов, имеющего высокую степень черноты в диапазоне низких температур ( $10^3 - 2 \cdot 10^3$  К). Так, в воздушной среде при снижении температуры значение степени черноты остается низким, а влияние излучения пренебрежимо малым, для воздуха при  $T = 2 \cdot 10^3$  К  $\epsilon = 2.9 \cdot 10^{-5}$  для  $p = 0.1$  МПа и  $\epsilon = 2.9 \cdot 10^{-4}$  для  $p = 1$  МПа.

Представленные диаграммы энергетического состояния плазмы равновесного дугового разряда позволяют установить соотношение мощностей радиационных и теплопроводных энергопотерь  $k$  (рис. 1, *a*, 2, *a*, 3, *a* и 4, *a*), значение максимальной температуры  $T_{\max}$  (рис. 1, *b*, 2, *b*, 3, *b* и 4, *b*), напряженности электрического поля (рис. 1, *c*, 2, *c*, 3, *c* и 4, *c*). Дополнительно к этим характеристикам по значению  $T_{\max}$  (рис. 1, *b* и 3, *b*) с учетом температурной зависимости коэффициента электропроводности  $\sigma(T)$  рассчитывается величина  $\sigma_{\max}$ , далее удельные 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 интегральных характеристик из рис. 2, *c* и 4, *c* сначала опреде-

ляется значение напряженности электрического поля  $E$ , затем вычисляются значения мощностей джоулевого тепловыделения  $IE$ , радиационных  $k_l IE$  и теплопроводных  $(1 - k_l) IE$  энергопотерь на единицу длины дугового столба. Таким образом, с помощью диаграмм состояния определяются основные энергетические характеристики стационарной электрической дуги, горящей в цилиндрическом канале.

При оценке параметров электрических дуг следует учитывать, что данные в диаграммах состояния соответствуют той части столба разряда, где отсутствует влияние приэлектродных областей.

## Заключение

Представленные диаграммы состояния позволяют оценить степень влияния и мощность энергетических механизмов, величины напряженности электрического поля и максимальной температуры в осесимметричном стационарном дуговом разряде, горящем в аргоне и углекислом газе при различных значениях  $R$  и  $I$ . Соотношение интегральных мощностей описывает энергобаланс всего

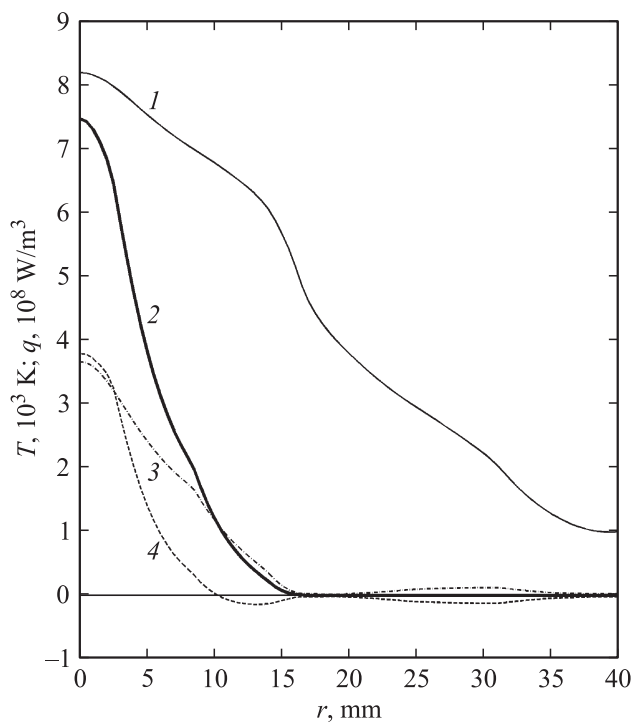


Рис. 5. Распределения  $T(r)$  (1),  $q_L(r)$  (2),  $q_R(r)$  (3) и  $q_T(r)$  (4) в углекислом газе.

разряда в целом, соотношение удельных мощностей энергетических механизмов в центре разряда устанавливает масштаб температуры, от которого в значительной степени зависят основные характеристики разряда. Энергетические характеристики разряда для одно-, двух- и трехатомных газов существенно различаются как по величине, так и характеру зависимостей.

## Список литературы

- [1] Васильев Е.Н. // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17. Вып. 3. С. 441–449.
- [2] Васильев Е.Н. // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 12. С. 47–51.
- [3] Ветлуцкий В.Н., Онуфриев А.Т., Севастьяненко В.Г. // ПМТФ. 1965. Вып. 4. С. 71–78.
- [4] Devoto R.S. // Phys. Fluid. 1967. Vol. 10. N 2. P. 354–364.
- [5] Каменщиков В.А., Пластинин Ю.А., Николаев В.М., Новицкий Л.А. Радиационные свойства газов при высоких температурах. М.: Машиностроение, 1971. 440 с.
- [6] Андриатис А.В., Соколова И.А. // Математическое моделирование. 1995. Т. 7. Вып. 2. С. 89–125.