

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

В. И. Бородин, Конвекция в ртутных дуговых разрядах с легкоионизируемыми примесями,
ТВТ, 1982, том 20, выпуск 3, 433–436

<https://www.mathnet.ru/tvt6329>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<https://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.9.168

17 мая 2025 г., 16:04:19



УДК 537.52

КОНВЕКЦИЯ В РТУТНЫХ ДУГОВЫХ РАЗРЯДАХ С ЛЕГКОИОНИЗУЕМЫМИ ПРИМЕСЯМИ

Бородин В. И.

Экспериментально исследовалась естественная конвекция в ртутных дуговых разрядах высокого давления с примесями иодидов натрия, таллия и индия. Получены распределения конвективных скоростей течения по радиусу разрядной трубки, на основе которых, с использованием литературных данных, предлагается выражение для оценки профиля аксиальной скорости конвективных потоков.

Естественная конвекция является одним из процессов переноса, обуславливающих состав многокомпонентной плазмы. Например, взаимодействие вертикального конвективного потока с радиальными диффузионными потоками приводит к возникновению аксиальной неоднородности в распределении концентрации атомов добавки в металло-галогидных лампах (МГЛ) [1] и к уменьшению их излучательной эффективности [2]. Значение конвективных потоков в разряде является необходимым элементом как для качественного понимания физики разряда, так и количественного его описания.

В чисто ртутных разрядах конвекция подробно изучалась во многих работах [3–6]. Вопрос же об изменении конвективных потоков при переходе от разрядов в чистом газе к разряду с добавками в литературе почти не рассматривался, хотя известно, что введение в разряд легкоионизируемой примеси приводит к уменьшению температуры разряда, что должно найти отражение в изменении скорости конвекции. Приведенные в [7] теоретически полученные радиальные профили конвективных скоростей для некоторых типов разрядов с примесями имеют частный характер. Экспериментальные данные по этому вопросу отсутствуют.

В данной работе приводятся результаты исследования конвекции в вертикально расположенных ртутных дуговых разрядах высокого давления с добавкой легкоионизируемого элемента и предлагается метод оценки аксиальных скоростей конвективного потока по известным внешним параметрам разряда.

Определение характера распределения скоростей конвективных потоков проводилось оптическими методами на разрядных трубках МГЛ [8]

Характеристики исследуемых ламп

Тип ламп	1	2	3
Мощность W , Вт	250	400	700
Ток I , А	2,0–2,5	3,0–4,0	5,0–7,0
Напряжение U , В	110–130	110–130	110–130
Внутренний диаметр трубки d , см	1,4–1,8	1,6–2,2	2,0–2,8
Межэлектродное расстояние l , см	3,5–4,0	4,0–5,0	5,5–7,2
Наполнение m , мг			
Hg	30–50	50–80	105–125
Tl	1,8; 3,0	1,8; 3,0	7; 8
NaI	18; 15	18; 15	25; 40
InI	0,2; 0,1	0,2; 0,1	1; 2
Наполнение p , кПа (при $T=300$ К)			
Ar	2,7	2,7	2,7

с примесью иодидов таллия, натрия и индия путем наблюдения движения пробных светящихся частиц, вводимых в разряд импульсно.

Исследования проводились для трех типов ламп с характеристиками, приведенными в таблице, в двух температурных режимах стенки трубки: обычный режим — $T=1000$ К и режим с охлаждением, когда T падала до 700 К, в результате чего осуществлялся переход к чисто ртутному разряду, поскольку добавки практически полностью конденсировались на стенке.

Схема установки представлена на рис. 1. Луч мощного импульсного лазера 1 (ГОР-100), который фокусируется с помощью линзы 2 на внутреннюю поверхность стенки трубки или электрода, вызывает испарение материала электрода и вещества, покрывающего его поверхность или поверхность стенки. Динамика движения испарившегося вещества, которое состоит из смеси атомов (молекул) и микрочастиц, наблюдалась визуально и регистрировалась кинокамерой 4. Микрочастицы проявляли себя в виде движущихся светящихся точек, атомы — в виде расплывающегося светящегося в соответствующей области спектра облака, излучение которого выделялось интерференционным светофильтром 6. Трубка 5, подключенная к компрессору, создавала регулируемую струю воздуха для локального охлаждения стенки трубки с целью накопления вещества в месте фокусировки луча за счет конденсации. Оптимальные величины впрыскиваемого в разряд вещества подбирались экспериментально, исходя из условия минимального возмущения разряда путем регулирования мощности излучения лазера в импульсе, а также количества накопленного (сконденсированного) вещества на стенке. Длительность импульса 1 мс.

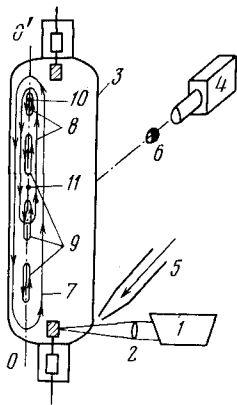


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — импульсный лазер; 2 — фокусирующая линза; 3 — исследуемая разрядная трубка; 4 — кинокамера; 5 — охлаждающая трубка; 6 — интерференционный светофильтр; 7 — 9 — траектории конвективного движения частиц

На рис. 2 представлена кинограмма процесса движения впрыскиваемого вещества. Характер распределения конвективных потоков в исследо-

ванных разрядных трубках (250–700 Вт) приведен на рис. 1. Движение во всех случаях ламинарное. Поведение потоков не следует строго «классической» форме [3, 8] (траектория 7), и часть внутренних струй, граничащих с OO' -цилиндрической поверхностью нулевой вертикальной скорости, замыкаются, не дойдя до низа трубки (траектория 8). Однако основная масса газа переносится струями, близкими к траектории 7. Приближенно можно считать, что радиальные составляющие конвективных потоков по всей длине межэлектродного промежутка отсутствуют, за исключением концевых областей. С увеличением радиуса трубки (до $R=1,5$ см) траектории движения частиц начинают приближаться к эллипсам, причем «центр вращения» 10 опускается вниз, к середине высоты трубки 11. С уменьшением радиуса трубки (до $R=0,7$ см) у поверхности OO' появляются циркуляции (ячейки 9), однако скорости потоков в них малы, а сами ячейки мало развиты в смысле занимаемого объема. В дальнейшем



Рис. 2. Кинограмма движения пробных частиц (показаны стрелкой) в разряде. Скорость съемки 24 кадра / с; $T=980$ К; $W=700$ Вт; $I=6,2$ А; $d=2,4$ см; $l=7,2$ см; $m_{Hg}=0,105$ г; $m_{TlI}=8$ мг; $m_{NaI}=40$ мг; $m_{InI}=1,2$ мг

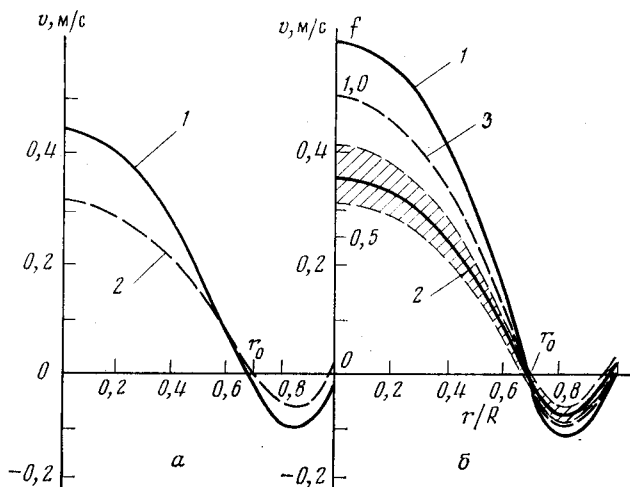


Рис. 3. Радиальное распределение скорости конвективных потоков в разряде с потребляемой мощностью: *a* — 250 и 400 Вт (соответственно $T=900$ и 920 К, $I=2,1$ и $3,7$ А, $d=1,6$ и $1,9$ см, $l=3,8$ и $5,0$ см, $m_{\text{Hg}}=40$ и 55 мг, $m_{\text{THI}}=3$ мг, $m_{\text{NaI}}=1,5$ мг, $m_{\text{InI}}=0,1$ мг); *б* — 700 Вт (параметры см. на рис. 2). Кривая 1 соответствует чисто ртутному разряду; 2 — разряду с добавками; 3 — (5)

концевые области не рассматриваются, поэтому радиальной составляющей конвективных потоков можно пренебречь.

Результаты определения вертикальной составляющей скорости течения v для чисто ртутного разряда и разряда с добавками приведены на рис. 3. Различие в величинах скоростей по высоте трубки лежит в пределах погрешности эксперимента (относительная среднеквадратичная погрешность 20%). Из рисунка видно, что меньше скорости потоков в лампах с добавками. Координата точки r_0 , в которой $v=0$, равна $(0,33-0,25) R$, что близко к значению для чисто ртутного разряда. Это дает возможность обобщить полученные результаты, распространив принцип подобия для конвективного движения в ртутных разрядах [3, 8] на разряды с добавками.

Тогда распределение скорости потоков по радиусу можно представить единой функцией

$$v(\rho) = v_0 f(\rho), \quad (1)$$

где $\rho = r/R$ — относительный радиус; v_0 — скорость на оси горелки, если $f(0) = 1$. Для v_0 выбрано соотношение [1]

$$v_0 = A p R^2, \quad (2)$$

которое следует из анализа размерностей уравнения конвекции, полученного Эленбаасом для чисто ртутного разряда. Здесь p — давление в плазме; A определяется свойствами плазмообразующей среды.

Соотношение (2) проверено авторами данной работы экспериментально как для разрядов, так и на модели, имитирующей разряд и состоящей из закрытого с торцов стеклянного цилиндра с расположенной вдоль его оси спиралью, нагреваемой внешним источником тока. Выражение (2) выполнялось в диапазоне значений произведения критериев $\text{GrPr} = 10^3 - 5 \cdot 10^4$ и радиуса модели $R = 0,8 - 2$ см, характерных для рассматриваемых типов разрядов. Здесь GrPr — произведение чисел Грасгофа и Прандтля, характеризующее интенсивность конвективных потоков [9]. При $\text{GrPr} > 8 \cdot 10^3$ наблюдалась многоячейчатая конвекция.

Наличие давления осложняет использование формулы (2), поскольку давление в горелке является трудно измеримой величиной. Для исключения p из (2) можно воспользоваться выражением, полученным Кенти для ртутных разрядов [8]

$$p = 0,075 W_1^{1/4} m_1^{0,8} / (2R)^{2,1}, \quad (3)$$

где W_1 , m_1 — мощность и количество испарившейся ртути на единицу длины разряда (в Вт/см и мг/см); p — в МПа. Величину m_1 легко найти по известной мощности, длине разряда и количеству вводимой в трубку ртути, которая полностью испаряется. Тогда (1) примет вид

$$v(\rho) = C \zeta f(\rho) W_1^{\frac{1}{4}} m_1^{0,9} / (2R)^{0,1}, \quad (4)$$

где ζ — коэффициент, учитывающий отклонение скоростей в разряде с добавками от чисто ртутного разряда, для которого он равен единице; C — константа, равная 2 с учетом хорошего совпадения результатов [5, 6] и наших данных. График функции f приведен на рис. 3. Для удобства вычисления $f(\rho)$ можно аппроксимировать следующим полиномом:

$$f(\rho) = 1 - 0,18\rho + 1,19\rho^2 - 19,64\rho^3 + 54\rho^4 - 66,58\rho^5 + 30,21\rho^6. \quad (5)$$

Величина ζ определяется по рис. 3. При малых значениях ΔT ($\Delta T / T_0 \leq 0,3$)

$$\zeta = 1 - 2,4 \Delta T / T_0, \quad (6)$$

где $\Delta T = T_0 - T_1$ — разность температур для чисто ртутного разряда T_0 и разряда с добавками T_1 в центре трубки. Значение температуры в центре разряда, полученное спектральными методами, для лампы мощностью 700 Вт составляло величину 5400 ± 200 К для чисто ртутного разряда и 4500 ± 200 К для разряда с добавками иодидов таллия, натрия и индия.

Таким образом, зная относительное изменение температуры $\Delta T / T_0$ и используя приведенные соотношения, можно определить изменение скорости конвективного течения при переходе от чисто ртутного разряда к разрядам с легкоионизируемыми примесями. При известном составе плазмы величину $\Delta T / T_0$ можно оценить по формуле Саха, записанной для смеси с учетом постоянства концентрации электронов при таком переходе и при неизменных внешних условиях разряда (тока, мощности).

Петрозаводский
государственный университет

Поступила в редакцию
22.V.1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Fischer E. Axial segregation of additives in mercury-metal halide arcs.— J. Appl. Phys., 1976, v. 47, N 7, p. 2954.
2. Уэймаус Д. Газоразрядные лампы. М.: Энергия, 1977, 344 с.
3. Elenbaas W. The High Pressure Mercury Vapor Discharge. Amsterdam: North Holland Publishing Company, 1951, 310 p.
4. Kenty C. On Convection Currents in High Pressure Mercury Arcs.— J. Appl. Phys., 1938, v. 9, N 1, p. 53.
5. Lowke J. J. Calculated properties of vertical arcs stabilized by natural convection.— J. Appl. Phys., 1979, v. 50, N 1, p. 147.
6. Zollweg R. J. Convection in vertical high-pressure mercury arcs.— J. Appl. Phys., 1978, v. 49, N 3, p. 1077.
7. Zollweg R. J. Convection in vertical mercury and metal halide arc lamps.— J. Illum. Eng. Soc., 1979, N 4, p. 126.
8. Ртутные лампы высокого давления / Под ред. И. М. Весельницкого, Г. Н. Рохлина; М.: Энергия, 1971, 328 с.
9. Гребер Г., Эрк С., Григуль У. Основы учения о теплообмене. М.: ИЛ, 1958, 520 с.