

УДК 536-37: 621.32

Э.А. СОСНИН****, А.А. ПИКУЛЕВ**, В.А. ПАНАРИН*, В.Ф. ТАРАСЕНКО*****

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ И СКОРОСТЬЮ КОНВЕКЦИИ В ЭКСИЛАМПАХ ЕМКОСТНОГО РАЗРЯДА¹

Экспериментально и теоретически изучены термодинамические процессы в эксилампах емкостного разряда, конструкция которых облегчает конвекцию газа. Показано, что с увеличением скорости конвекции в эксилампе растут её полезный срок службы, мощность и стабильность излучения.

Ключевые слова: эксилампа, емкостной разряд, излучение, конвекция.

Сегодня эксилампы нашли применение в различных областях науки и техники [1] и на первый план выходит изучение прикладных аспектов работы устройств, в частности достижение высоких полезных сроков службы [2, 3]. В [4] была предложена коаксиальная колба эксилампы барьерного разряда с сегментированным электродом, конструкция которой позволила увеличить энергетическую светимость лампы [мВт/см²] на треть и увеличить полезный срок службы эксилампы примерно вдвое. Предполагалось, что полученный эффект был связан с конвекцией рабочей смеси, но специально этот вопрос не исследовался. Цель данной работы – экспериментально и теоретически изучить влияние конвекции на интенсивность и срок службы эксилампы емкостного разряда.

Конструкция экспериментальной установки показана на рис. 1. Колба 1 изготовлена из кварцевого стекла (марка кварца ТКг, ООО «Техно кварц»). Разряд зажигался в промежутке между электродами 2 и 3 при подаче на них импульсного напряжения от источника питания 4: импульсы напряжения имели форму меандра, амплитуду до 5.2 кВ и длительность импульса на полувысоте 1.5 мкс, а частота следования импульсов f не превышала 97 кГц. Эту часть трубки будем далее называть активной (А), так как здесь рассеивается мощность, вкладываемая в лампу от источника питания 4. Активное плечо трубки было связано двумя обводными каналами с буферным плечом (В), имеющим больший диаметр, что снижает гидродинамическое сопротивление. При включении лампы начинается конвекция разогретой смеси. Для управления ею использовались разные рабочие давления (p) и энерговклады (P_{in}) в среду. Испытания проводились как в случае, когда колба лампы не охлаждалась, так и в случае, когда буферное плечо подвергалось воздушному охлаждению 8. Это увеличивало перепад температур между плечами и, как предполагалось, должно увеличивать скорость конвекции.

Колба заполнялась смесями Хе:Cl₂ при соотношениях (400–50):1 и давлениях $p < 90$ Торр. Смеси готовились в газовом посту 6, который отсекался от колбы во время экспериментов (т.н. квазиотпаянный режим работы). Как показано в наших предыдущих работах, такие испытания по-

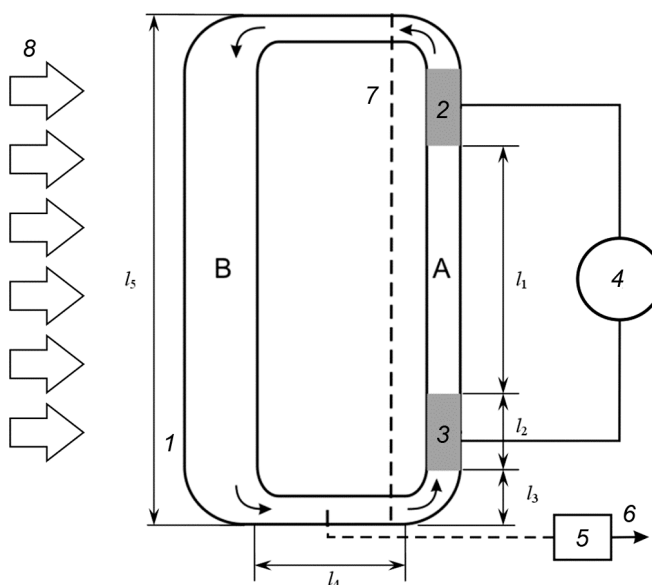


Рис. 1. Схема установки: 1 – колба; 2, 3 – электроды; 4 – источник питания; 5 – датчик давления; 6 – система напуска и откачки газовой смеси; 7 – перегородка; 8 – поток воздушного охлаждения. А – активное плечо колбы, в котором осуществляется емкостной разряд; В – буферное плечо колбы

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-08-00020-а) и в рамках госзадания ИСЭ СО РАН по теме № 13.1.3.

зволяют качественно судить об изменениях полезного срока службы газоразрядного прибора. Испытания проводились для колбы, установленной вертикально. Для каждого случая определялось время, за которое интенсивность излучения упадет на 50 % от стартовой величины.

Энергетические параметры эксилампы измеряли в диапазоне $\lambda = 200\text{--}350$ нм с помощью фотоприемника HAMAMATSU H8025-222. Также при включении лампы регистрировался скачок давления в колбе при помощи датчика давления DMP 330L.

Была построена модель конвекции смеси в эксилампе с размерами, указанными на рис. 1. При моделировании были использованы следующие предположения: 1) скорость тепловой конвекции мала (не более 10 см/с), поэтому течение является ламинарным и эффектами инерции потока на сужениях-расширениях и изгибах кюветы можно пренебречь; 2) течение можно считать стационарным, происходящим при постоянной температуре стенок кюветы; 3) процесс нагрева газа и теплообмена происходит независимо от процесса конвекции (т.е. газ можно считать неподвижным). Все расчеты проведены для чистого ксенона, поскольку добавка хлора мала и слабо влияет на термо- и газодинамические параметры смеси.

Для определения скорости тепловой конвекции было рассмотрено течение газа вдоль прямолинейного элемента l , направление движения вдоль которого задано единичным вектором \mathbf{e} . С учетом предположений (1) – (3) можно считать, что линии тока являются прямыми линиями, параллельными оси элемента кюветы, а скорость газа в каждом сечении является величиной постоянной. В цилиндрических координатах (l, r, φ) уравнение Навье – Стокса для цилиндрической трубки имеет вид [5]

$$\frac{\Delta p}{l} + \rho g(\mathbf{e}, \mathbf{k}) = \frac{\mu}{r} \frac{d}{dr} \left\{ r \frac{du}{dr} \right\}, \quad (1)$$

где Δp – перепад давления на длине элемента l ; $u = u(r)$ – распределение скорости газа по радиусу трубки; g – ускорение свободного падения; \mathbf{k} – орт вертикальной оси ($0z$); (\mathbf{e}, \mathbf{k}) – скалярное произведение единичных векторов \mathbf{e} и \mathbf{k} ; ρ – плотность газа; μ – коэффициент динамической вязкости.

Граничные условия для уравнения (1) – условие прилипания на стенке трубки $u(R) = 0$ и условие ограниченности скорости.

Ниже будем пренебрегать неоднородностью распределения плотности по радиусу трубки и в качестве ρ использовать среднее по сечению трубки значение (поскольку везде, кроме области разряда, температура газа практически совпадает с температурой стенки трубки, а учет распределения плотности в активной области слабо влияет на результат).

Решая уравнение (1) с учетом граничных условий, для распределения скорости газа получаем следующее выражение:

$$u = \frac{r^2 - R^2}{4\mu} \left\{ \frac{\Delta p}{l} + \rho g(\mathbf{e}, \mathbf{k}) \right\}. \quad (2)$$

Расход газовой смеси через поперечное сечение трубки определяется по формуле

$$Q = 2\pi\rho \int_0^R u(r)rdr = -\frac{\pi\rho R^4}{8\mu} \left\{ \frac{\Delta p}{l} + \rho g(\mathbf{e}, \mathbf{k}) \right\}. \quad (3)$$

Рассмотрим тепловую конвекцию в замкнутой кювете, состоящей из прямолинейных отрезков трубок длиной l_i с радиусами R_i . Согласно (3), падение давления на i -м элементе определяется по формуле

$$\Delta p_i = -\frac{8\mu l_i Q}{\pi\rho_i R_i^4} - \rho_i g l_i(\mathbf{e}_i, \mathbf{k}). \quad (4)$$

Суммируя по всей кювете и учитывая, что для замкнутого контура $\sum \{\Delta p_i\} = 0$, для расхода газа получаем выражение

$$Q = -\frac{\pi g \sum_i \rho_i l_i(\mathbf{e}_i, \mathbf{k})}{8\mu \sum_i \frac{l_i}{\rho_i R_i^4}}. \quad (5)$$

Здесь на вертикальных участках $(\mathbf{e}_i, \mathbf{k}) = 1$, если направление движения при обходе кюветы направлено вверх, и $(\mathbf{e}_i, \mathbf{k}) = -1$, если направление движения направлено вниз. На горизонтальных

участках $(\mathbf{e}_i, \mathbf{k}) = 0$. Для определения величин плотности газа ρ_i в (5) будем полагать, что полный объем кюветы $V = V_A + V_B$. Начальные параметры смеси (до зажигания разряда): давление p_0 , плотность ρ_0 , температура T_0 . Во время работы лампы средняя температура и плотность смеси в активном объеме составляют соответственно T_A и ρ_A . В буферном объеме плотность равна ρ_B , а температура равна температуре стенок, которая составляет T_B . Давление при работе лампы распределено однородно по объему кюветы (небольшими неоднородностями давления, связанными с конвективным движением смеси пренебрегаем) и равно p .

Термодинамические параметры смеси связаны уравнением состояния

$$p_0 = \frac{R_g}{M} \rho_0 T_0, \quad p = \frac{R_g}{M} \rho_A T_A = \frac{R_g}{M} \rho_B T_B, \quad (6)$$

где R_g – универсальная газовая постоянная; M – молярная масса.

Кроме того, поскольку кювета герметичная, выполняется закон сохранения массы $\rho_0 V = \rho_A V_A + \rho_B V_B$. Отсюда, используя второе соотношение из (6), получаем следующие выражения для плотности газа в активной и буферной части кюветы:

$$\rho_A = \frac{\rho_0 T_B V}{T_A V_B + T_B V_A}, \quad \rho_B = \frac{\rho_0 T_A V}{T_A V_B + T_B V_A}. \quad (7)$$

В соотношениях (6), (7) присутствует температура смеси в активной области T_A . При горении разряда температура смеси будет выше, чем температура стенки кюветы, которую ниже будем обозначать $T_A(R)$.

Поскольку тепловая мощность разряда и ее распределение по объему трубки неизвестно, для определения температуры газа использовался метод скачка давления. В этом случае фиксировалась амплитуда скачка давления Δp_0 , возникающего в «холодной» кювете после зажигания разряда. Из соотношений (6), (7) получаем выражение для скачка температуры газа $\Delta T_A = T_A - T_A(R)$ в активной области

$$\Delta T_A = \frac{\Delta p T_0 V_B}{p_0 V_A - \Delta p_0 V_B}. \quad (8)$$

В таблице представлены результаты расчётов, полученные для смеси $\text{Xe}:\text{Cl}_2 = 200:1$ при различных давлениях (температура плеча В во всех экспериментах составляла около 35 °С).

Результаты расчетов для смеси $\text{Xe}:\text{Cl}_2 = 200:1$

Параметры	№ эксперимента					
	1	2	3	4	5	6
Начальное давление p_0 , Торр	12.2	21.7	33.8	41	41.25	43.1
Скачок давления Δp , Торр	0.6	1.1	2.05	2.3	2.2	1.25
Скачок температуры в активной области ΔT_A , К	106	110	140	126	118	56
Мощность разряда P_{in} , Вт	3.2	11.6	14.5	16.9	17	9
Тепловая мощность разряда (эффективная) W_{eff} , Вт	1.25	1.30	1.65	1.49	1.39	0.66
Средняя температура газа в плече А T_A , °С	178	220	260	241	228	106
Расход смеси Q , мг/с	0.063	0.23	0.61	0.86	0.84	0.47
Скорость конвекции в области разряда, см/с	1.7	3.8	7.0	7.9	7.6	3.2
Характерное время смены смеси в кювете, с	40	19.6	11.4	9.8	10.1	18.6

Скачок температуры в активной области (область разряда) ΔT_A определялся по формуле (8) с использованием измеренного значения скачка давления Δp . Эффективная тепловая мощность разряда определялась в предположении, что тепловыделение разряда распределено однородно по объему активной области кюветы

$$W_{eff} = \frac{8\lambda \Delta T_A V_A}{R_1^2}. \quad (9)$$

Из таблицы следует, что с повышением давления смеси с 12 до 43 Торр доля тепловой мощности разряда падает с 35 до 7 % от полной мощности разряда. Расход смеси в кювете за счет свободной тепловой конвекции определялся по формуле (5). При $p = 41$ Торр достигаются максимальные величины расхода ~ 0.9 мг/с и скорости конвекции ~ 8 см/с газа. Кроме того, расчёты по-

казали, что скорость конвекции практически не зависит от того, охлаждается плечо В или нет. Это связано с тем, что при охлаждении плеча В температура смеси понижается не только в плече В, но и в плече А, т.е. разность температур смеси в плечах А и В изменяется незначительно, а именно это и определяет скорость конвекции.

Результаты исследований оптимальной (с точки зрения выхода излучения) смеси Хе:Cl₂ = 200:1 при различных величинах p и P_{in} показаны на рис. 2. Видно, что с увеличением давления и вкладываемой мощности (p и P_{in}) происходит увеличение полезного срока службы смеси $t^{0.5}$. Всё это мы связываем с увеличением скорости конвекции через активное плечо А. Дополнительно в пользу этого говорит тот факт, что с ростом P_{in} и включением охлаждения буферного плеча разряд горит стабильнее.

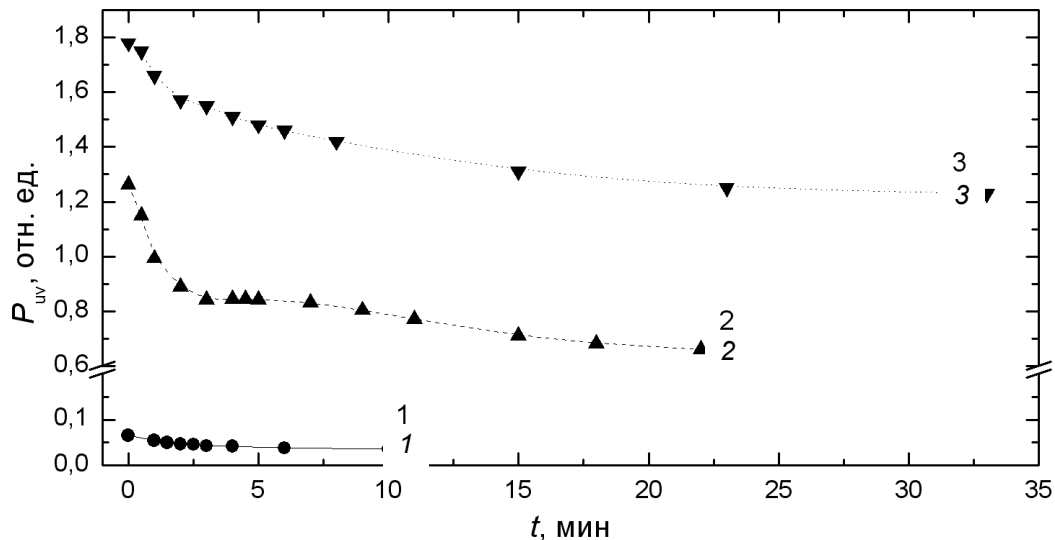


Рис. 2. Ресурсные испытания при различных энерговыкладах P_{in} и давлениях p смеси Хе:Cl₂ = 200:1: кр. 1 – $P_{in} = 3.2$ Вт, $p = 1$ Торр; кр. 2 – $P_{in} = 11.6$ Вт, $p = 21$ Торр; кр. 3 – $P_{in} = 16.9$ Вт, $p = 40$ Торр

Итак, проведенные измерения и расчёты свидетельствуют о том, что интенсивность конвекции в эксилампе емкостного разряда является газодинамическим маркером мощности излучения и полезного срока службы эксилампы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автаева С.В., Жданова О.С., Пикулев А.А., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. Новые направления в научных исследованиях и применении эксиламп. – Томск: STT, 2013. – 246 с.
2. Соснин Э.А., Ерофеев М.В., Лисенко А.А. и др. // Оптический журнал. – 2002. – Т. 69. – № 7. – С. 77–80.
3. Авдеев С.М., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. // Оптический журнал. – 2010. – Т. 77. – № 1. – С. 54–57.
4. Соснин А.Э., Ерофеев М.В., Тарасенко В.Ф. и др. Источник излучения // Патент RU 2271590. Приоритет 15.03.2004. Опубликовано 10.03.2006. Бюл. № 7.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. – М.: Наука, 1988. – 736 с.

*Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 01.10.14.

**Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров, Россия

***Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

E-mail: badik@loi.hcei.tsc.ru

Соснин Эдуард, д.ф.-м.н., ст. науч. сотр., профессор;

Пикулев Алексей, к.ф.-м.н., начальник лаборатории;

Панарин Виктор, инженер;

Тарасенко Виктор Федотович, д.ф.-м.н., профессор.

E.A. SOSNIN, A.A. PIKULEV, V.A. PANARIN, V.F. TARASENKO

THE INTERRELATION OF ENERGY PARAMETERS AND GAS CONVECTION RATE IN CAPACITIVE DISCHARGE EXCILAMPS

The thermodynamic processes in capacitive discharge excilamps are investigated experimentally and theoretically. The excilamps design allows to realize the gas mixture convection. It is shown that convection rate increasing leads to growth of life utility, ultraviolet power and consistency of results.

Keywords: capacitive discharge, excilamp, convection rate, Navier-Stokes equation.

REFERENCES

1. Sosnin E.A., Tarasenko V.F., Lomaev M.I. *UV and VUV excilamps*. Saarbrücken, Deutschland, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012.
2. Sosnin E.A., Erofeev M.V., Lisenko A.A., et al. (2002). *J. Opt. Technol.*, 69, 509–512.
3. Avdeev S.M., Sosnin E.A., Tarasenko V.F. (2010). *J. Opt. Technol.*, 77, 42–44.
4. Sosnin E.A., Erofeev M.V., Tarasenko V.F., et al. // Patent RU 2271590. Priority data 15.03.2004. Publ. 10.03.2006. Bull. No. 7.
5. Landau L.D., E.M. Lifshits. *Theoretical physics. Vol. VI. Hydrodynamics*. Moscow, Nauka, 1988.