

## Влияние температуры на ионизационный коэффициент и напряжение зажигания таунсендовского разряда в смеси аргона с парами ртути

© Г.Г. Бондаренко,<sup>1</sup> М.Р. Фишер,<sup>2</sup> В.И. Кристья<sup>2,†</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, 101000 Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал, 248000 Калуга, Россия

<sup>†</sup> e-mail: kristya@bmstu-kaluga.ru

(Поступило в Редакцию 7 июня 2016 г.)

В широком интервале значений приведенной напряженности электрического поля и температуры проведено моделирование кинетики основных типов заряженных и возбужденных частиц в слаботоочном разряде в смеси аргон–ртуть, используемой в газоразрядных осветительных лампах. Найдены температурные зависимости вкладов различных механизмов образования и потерь ионов и метастабильных атомов в поддержание их баланса. Показано, что на этапе зажигания разряда в лампе, когда содержание ртути в смеси мало, возрастание ионизационного коэффициента в ней по сравнению с чистым аргоном практически полностью обусловлено реакцией Пеннинга, роль которой увеличивается с уменьшением приведенной напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке. Рассчитаны зависимости напряжения зажигания разряда от межэлектродного расстояния (кривые Пашена) при различных температурах смеси и дано объяснение немонотонной зависимости его величины от температуры.

DOI: 10.21883/JTF.2017.02.44125.1918

### Введение

В настоящее время, несмотря на интенсивную разработку светодиодных технологий, одним из основных типов осветительных приборов остаются газоразрядные лампы [1–3]. Часто в них в качестве рабочего газа используется смесь аргона с концентрацией, соответствующей его давлению  $10^2$ – $10^4$  Па при комнатной температуре, и паров ртути, концентрация которых зависит от температуры. При включении лампы происходит пробой газа в межэлектродном промежутке под действием напряжения, приложенного к ее электродам, и зажигается слаботоочный (таунсендовский) разряд, переходящий затем в тлеющий разряд с катодным падением напряжения в несколько сот вольт. В результате бомбардировки катода ионами, ускоряемыми в катодном слое тлеющего разряда, с его поверхности происходит эмиссия электронов, необходимых для поддержания разряда, а также его нагрев и распыление эмиссионного вещества. Когда температура катода становится достаточно высокой, с него начинается термическая эмиссия электронов, и разряд переходит в дуговой, характеризующийся значительно меньшим катодным падением напряжения, чем тлеющий разряд [4–6]. При этом наиболее интенсивное распыление катода, приводящее к потере эмиссионного вещества и ограничивающее срок службы лампы, происходит до перехода разряда в дуговую форму, так как долговечность лампы в непрерывном режиме работы значительно превосходит ее величину в режиме периодических включений и выключений [7,8].

Напряжение пробоя, так же как и напряжение горения тлеющего разряда, от которого существенно зависят

энергии бомбардирующих катод ионов, определяется процессами эмиссии электронов с катода и ионизации рабочего газа в разрядном объеме. Первый из них характеризуется эффективным коэффициентом ионно-электронной эмиссии, равным среднему числу эмиттируемых электронов в расчете на один падающий на катод ион, а второй — ионизационным коэффициентом (ИК), равным среднему числу ионизаций атомов рабочего газа на единицу длины разряда в расчете на один электрон. Особенность смеси аргона с парами ртути состоит в том, что в ней, кроме прямой ионизации атомов электронами, происходит также ионизация атомов ртути при столкновениях с метастабильными возбужденными атомами аргона (реакция Пеннинга) [9,10]. Это обуславливает зависимость величины ИК и напряжения зажигания разряда от температуры, так как при ее возрастании увеличивается содержание ртути в смеси. Поэтому исследование процессов, происходящих при протекании электрического тока в смеси аргон–ртуть, представляет значительный интерес. Однако данному вопросу посвящено лишь небольшое число работ. В частности, в [11,12] измерены значения ИК в слаботоочном разряде между плоскими электродами при различных значениях относительного содержания ртути в смеси и напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке. В работе [13] проведены расчеты зависимости ИК и вкладов в него нескольких типов межчастичных взаимодействий от приведенной напряженности электрического поля. При этом величина концентрации электронов выбиралась из условия соответствия результатов расчета экспериментальным данным работы [11], а концентрации ионов и возбужденных атомов определя-

лись из усредненных по объему уравнений их баланса. Роль различных взаимодействий в смеси аргон–ртуть детально исследована лишь в положительном столбе дугового разряда [14–18], для которого характерны малые значения напряженности электрического поля и средней энергии электронов. В [19] проведено численное моделирование динамики пробоя в колбе лампы и исследованы протекающие в ней процессы при нескольких фиксированных величинах относительного содержания ртути в смеси. В ряде работ, например в [10,12], экспериментально установлено, что зависимость напряжения зажигания разряда в такой смеси от ее температуры является немонотонной: возрастающей при температурах порядка комнатной и убывающей при ее более высоких значениях, наблюдающихся в течение некоторого промежутка времени после погасания дугового разряда в лампе. Детальное же изучение влияния различных типов межчастичных взаимодействий на характеристики разряда в смеси аргон–ртуть на этапе его зажигания при различных температурах до настоящего времени не проводилось.

В настоящей работе рассчитан перенос электронов, ионов и метастабильных возбужденных атомов в слаботорочном разряде в смеси аргон–ртуть в достаточно широком интервале значений приведенной напряженности электрического поля и температуры. Определены концентрации заряженных и возбужденных частиц в разрядном промежутке, вклады различных типов межчастичных взаимодействий в поддержание их баланса как функции относительного содержания ртути в смеси, а также вычислено напряжение зажигания разряда при различных температурах рабочего газа.

## Описание модели разряда

Пусть между параллельными плоскими электродами, расстояние  $d$  между которыми много меньше их поперечных размеров, приложено напряжение  $U$ , достаточное для пробоя межэлектродного промежутка, заполненного аргоном с концентрацией  $n_{Ar}$  и насыщенными парами ртути с концентрацией  $n_{Hg}$ . Ось  $z$  координатной системы считается направленной перпендикулярно к электродам, причем поверхность катода совпадает с плоскостью  $z = 0$ , а анода — с плоскостью  $z = d$ . На начальном этапе разряда плотность тока  $j$  в нем достаточно мала, поэтому объемный заряд не искажает распределения электрического поля в межэлектродном промежутке, которое во всех точках направлено параллельно оси  $z$  и равно  $E = U/d$ , т.е. разряд является слаботорочным [5,6].

Под действием поля электроны, образующиеся при ионизации атомов, ускоряются в направлении анода, а ионы — в направлении катода, сталкиваясь при этом с нейтральными атомами. Для моделирования движения электронов в настоящей работе применяется методика, основанная на использовании метода Монте-Кар-

ло [20–22]. Учитывается упругое рассеяние электронов на атомах компонент смеси, а также возбуждение и ионизация ими невозбужденных и метастабильных атомов с использованием зависимостей сечений этих процессов от скорости электрона, приведенных в [23–25]. В процессе расчета траекторий первичных и вторичных электронов (эмитируемых с катода и образующихся в разрядном промежутке при ионизации атомов компонент смеси) формируется функция их распределения по скоростям  $f_e(z_i, v, v_z)$  в каждом из  $s$ -интервалов длины  $\Delta z = d/s$ , на которые разбивается межэлектродный промежуток, где  $z_i = (i - 0.5)\Delta z$ ,  $i = 1, \dots, s$ ,  $v$  и  $v_z$  — скорость электрона и ее продольная составляющая.

Основными типами ионов в слаботорочном разряде в смеси аргона с парами ртути являются атомарные и молекулярные ионы обоих ее компонент  $Ar^+$ ,  $Ar_2^+$  и  $Hg^+$ ,  $Hg_2^+$  [19,26], а из возбужденных атомов наибольшую концентрацию имеют метастабильные аргона  $4^3P_0$ ,  $4^3P_2$  и ртути  $6^3P_0$ ,  $6^3P_2$ . Так как энергетические уровни двух типов метастабилей каждого газа достаточно близки, их можно рассматривать как идентичные, обозначив через  $Ar^*$  и  $Hg^*$  соответственно [13,19,27]. Атомы же, возбуждаемые на резонансные уровни (они обозначаются символами  $Ar^{**}$  и  $Hg^{**}$ ), быстро деэвозбуждаются, поэтому они не рассматриваются в данной модели. Учитываемые типы ион-атомных и атом-атомных взаимодействий, а также значения констант соответствующих процессов и источники, из которых взяты их значения, приведены в таблице.

При достаточно большой напряженности электрического поля в разрядном промежутке, характерной для слаботорочного разряда, движение атомарных и молекулярных ионов в нем с учетом взаимодействий, указанных в таблице, может быть описано на основе макроскопических уравнений их переноса, а метастабилей — на основе соответствующих диффузионных уравнений [35–37]. После их решения методом конечных разностей вычисляется количество электронов  $\Delta n_e$ , образующихся в единицу времени в единице разрядного объема при столкновениях тяжелых частиц (с учетом их потерь в процессах рекомбинации), и находятся соответствующие количества вторичных электронов, которые необходимо добавить в ячейки длиной  $\Delta z$ , на которые разбивается межэлектродный промежуток, при моделировании кинетики электронов методом Монте-Карло.

Затем снова производится моделирование движения электронов в разрядном промежутке с учетом дополнительных вторичных электронов и опять рассчитывается перенос ионов и метастабилей. Такой цикл повторяется пока относительная разность значений величин в последовательных итерациях станет достаточно малой.

После нахождения функции распределения электронов по скоростям  $f_e(z, v, v_z)$  может быть вычислен ИК смеси как сумма слагаемых, учитывающих вклады в него прямой ионизации атомов аргона и ртути электронами

Учитываемые в модели ион-атомные и атом-атомные взаимодействия, а также значения их констант

Реакция	Константа	Источник
$Ar^+ + 2Ar \rightarrow Ar_2^+ + Ar$	$2.7 \cdot 10^{-43} \text{ m}^6 \text{ s}^{-1}$	[27]
$Hg^+ + 2Hg \rightarrow Hg_2^+ + Hg$	$1.0 \cdot 10^{-43} \text{ m}^6 \text{ s}^{-1}$	[16]
$Ar^* + Ar^* \rightarrow Ar_2^+ + e$	$5.7 \cdot 10^{-16} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	[27]
$Ar^* + Ar^* \rightarrow Ar^+ + Ar + e$	$6.2 \cdot 10^{-16} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	[28]
$Hg^* + Hg^* \rightarrow Hg_2^+ + e$	$1.0 \cdot 10^{-20} v_a \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	[29]
$Hg^* + Hg^* \rightarrow Hg^+ + Hg + e$	$2.4 \cdot 10^{-19} v_a \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	[15]
$Ar^* + Hg \rightarrow Ar + Hg^+ + e$	$9.0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	[30]
$Ar^+ + Hg \rightarrow Ar + Hg^+$	$1.5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	[19]
$Ar^* + Ar \rightarrow 2Ar$	$3.0 \cdot 10^{-21} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	[28]
$Hg^* + Hg \rightarrow 2Hg$	$8.0 \cdot 10^{-21} v_a \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	[31]
$Hg^* + Ar \rightarrow Hg^{**} + Ar$	$2.0 \cdot 10^{-24} v_a \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	[32]
$Ar^* + 2Ar \rightarrow Ar_2 + Ar$	$1.1 \cdot 10^{-43} \text{ m}^6 \text{ s}^{-1}$	[28]
$Hg^* + 2Hg \rightarrow Hg_2 + Hg$	$1.6 \cdot 10^{-43} \text{ m}^6 \text{ s}^{-1}$	[33]
$Ar^+ + e \rightarrow Ar^{**} + hv$	$1.0 \cdot 10^{-17} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	[26]
$Hg^+ + e \rightarrow Hg^{**} + hv$	$1.0 \cdot 10^{-14} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	[34]
$Ar_2^+ + e \rightarrow Ar^{**} + Ar$	$8.5 \cdot 10^{-13} (T/T_e)^{0.67} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	[27]
$Hg_2^+ + e \rightarrow Hg^{**} + Hg$	$4.2 \cdot 10^{-13} (T/T_e)^{1.1} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	[16]

Примечание.  $v_a$  — средняя относительная скорость взаимодействующих атомов;  $T_e, K$  — электронная температура;  $T, K$  — температура смеси.

и ионизации при столкновениях тяжелых частиц:

$$\alpha(z) = \alpha_{Ar}(z) + \alpha_{Hg}(z) + \alpha_{Pen}(z), \quad (1)$$

где

$$\alpha_{Ar}(z) = n_{Ar} \iint \sigma_{iAr}(v) f_e(z, v, v_z) v dv dv_z / J_e(z),$$

$$\alpha_{Hg}(z) = n_{Hg} \iint \sigma_{iHg}(v) f_e(z, v, v_z) v dv dv_z / J_e(z),$$

$$\alpha_{Pen}(z) = \Delta n_e / J_e(z),$$

$$J_e(z) = \iint f_e(z, v, v_z) v_z dv dv_z,$$

$\sigma_{iAr}(v)$  и  $\sigma_{iHg}(v)$  — сечения ионизации атомов аргона и ртути электроном.

Зависимость ИК  $\alpha$  и его компонент, так же как и других характеристик разряда, от координаты  $z$  обусловлена тем, что вследствие наличия краевых эффектов вблизи электродов распределение электронов по скоростям близко к равновесному при заданной напряженности электрического поля  $E$  лишь в центральной части разрядного промежутка, где эти величины достигают своих установившихся значений [20,38].

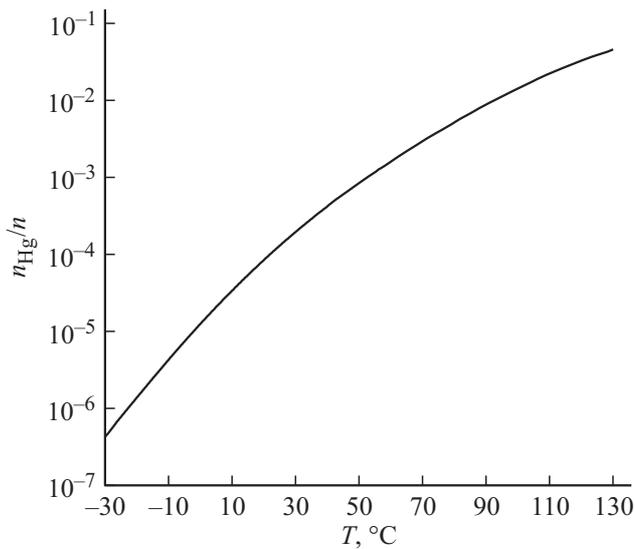
## Результаты расчетов и их обсуждение

Вычисления проводились для разрядного промежутка длиной  $d = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ , заполненного чистыми аргоном и ртутью, а также смесью аргона с концентрацией  $n_{Ar} = 6.57 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$ , соответствующей его давлению 2660 Pa при температуре 20°C, и насыщенных паров ртути, концентрация которых быстро растет с увеличением температуры [39], так что их относительная

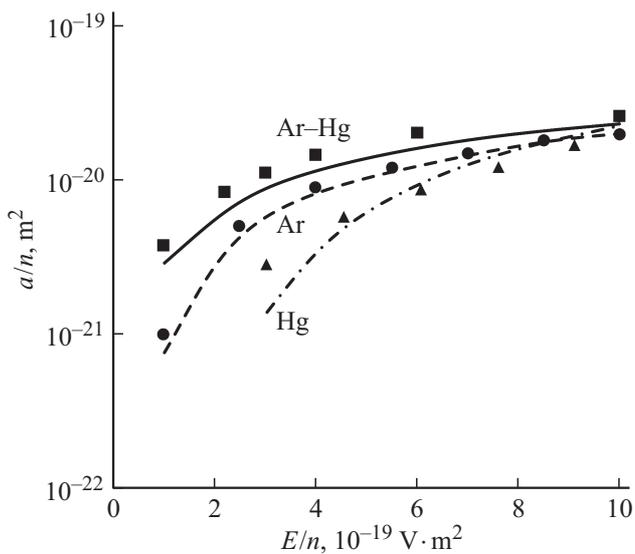
концентрация  $n_{Hg}/n$  (где  $n = n_{Ar} + n_{Hg}$ ) в температурном интервале от  $-30^\circ\text{C}$  до  $+130^\circ\text{C}$  изменяется от  $5 \cdot 10^{-7}$  до  $5 \cdot 10^{-2}$  (рис. 1). Использовалось значение плотности разрядного тока  $j = 1 \cdot 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ , для которой при  $U \sim 10^2 \text{ V}$  разряд является слаботочным [5].

В процессе моделирования движения электронов в разряде количество эмиттируемых с катода первичных электронов выбиралось равным  $10^3 - 10^4$  и предполагалось, что их начальные энергии равномерно распределены в интервале от 0 до 4 eV, а направления вылета изотропно распределены по углу относительно нормали к поверхности. Разрядный промежуток, а также интервалы изменения  $v$  и  $v_z$  разбивались на 100 частичных интервалов, т.е.  $s = 100$ . При расчете переноса ионов и метастабилей в смеси вследствие малого содержания в ней ртути использовались значения подвижностей в аргоне атомарных и молекулярных ионов аргона и ртути из [27,28,40], а также значения коэффициентов диффузии в аргоне метастабильных атомов обоих газов, приведенные в [28,32].

На рис. 2 представлены полученные зависимости величины ИК в центре разрядного промежутка (при  $z = d/2$ ) от приведенной напряженности электрического поля  $E/n$  в чистых аргоне и ртути, в смеси аргон-ртуть при  $n_{Hg}/n = 6 \cdot 10^{-3}$ , а также его экспериментальные значения [13,41,42]. Видно, что имеет место соответствие вычисленных и измеренных значений  $\alpha$ , подтверждающее удовлетворительную точность использованной модели. Найденная зависимость ИК в смеси аргон-ртуть от относительного содержания ртути в ней (рис. 3) также согласуется с экспериментальными данными, причем максимальное значение ИК достигается при  $n_{Hg}/n \approx 5 \cdot 10^{-3}$ . В случае значения концентрации аргона в смеси  $n_{Ar} = 6.57 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$ , характерного для



**Рис. 1.** Зависимость относительной концентрации насыщенных паров ртути в смеси аргон–ртуть от температуры при  $n_{\text{Ar}} = 6.57 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$  [39].

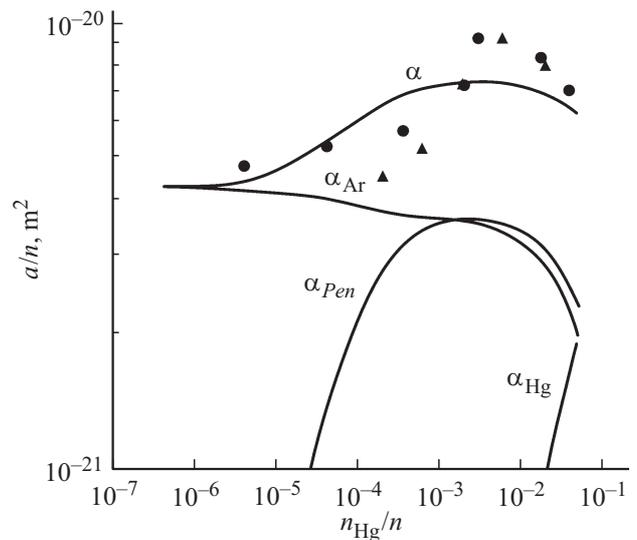


**Рис. 2.** Зависимость ИК от приведенной напряженности электрического поля в аргоне (штриховая линия), ртути (штрихпунктирная линия) и их смеси при  $n_{\text{Hg}}/n = 6 \cdot 10^{-3}$  (сплошная линия). Символы  $\bullet$ ,  $\blacktriangle$ ,  $\blacksquare$  — экспериментальные значения ИК для аргона [41], ртути [42] и их смеси [13] соответственно.

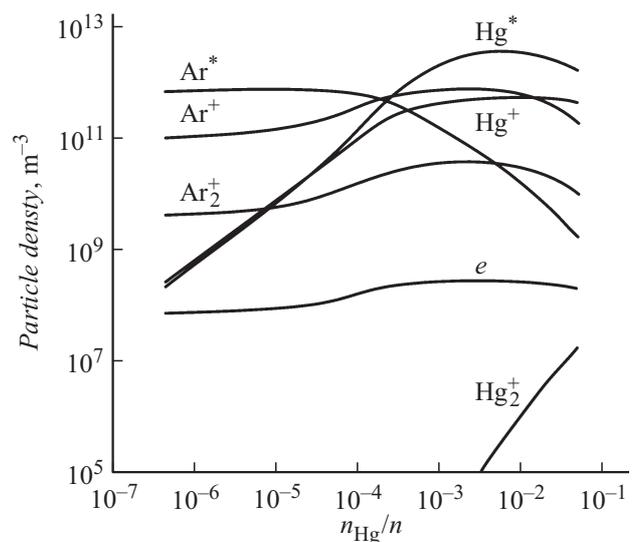
дуговых ртутных ламп высокого давления [4,12], это имеет место при температуре около  $70^\circ\text{C}$ , т.е. на этапе зажигания лампы интенсивность процесса ионизации возрастает с увеличением температуры окружающей среды. При этом основной вклад в величину  $\Delta n_e$ , определяющую увеличение ИК в смеси по сравнению с чистым аргонном, дает слагаемое, обусловленное пеннинговской ионизацией атомов ртути метастабильями аргона, роль которой становится более существенной с уменьшением напряженности электрического поля  $E$ . Вклад же

прямой ионизации атомов ртути электронами ввиду их малой относительной концентрации, как видно из рис. 3, при  $n_{\text{Hg}}/n < 10^{-2}$  незначителен.

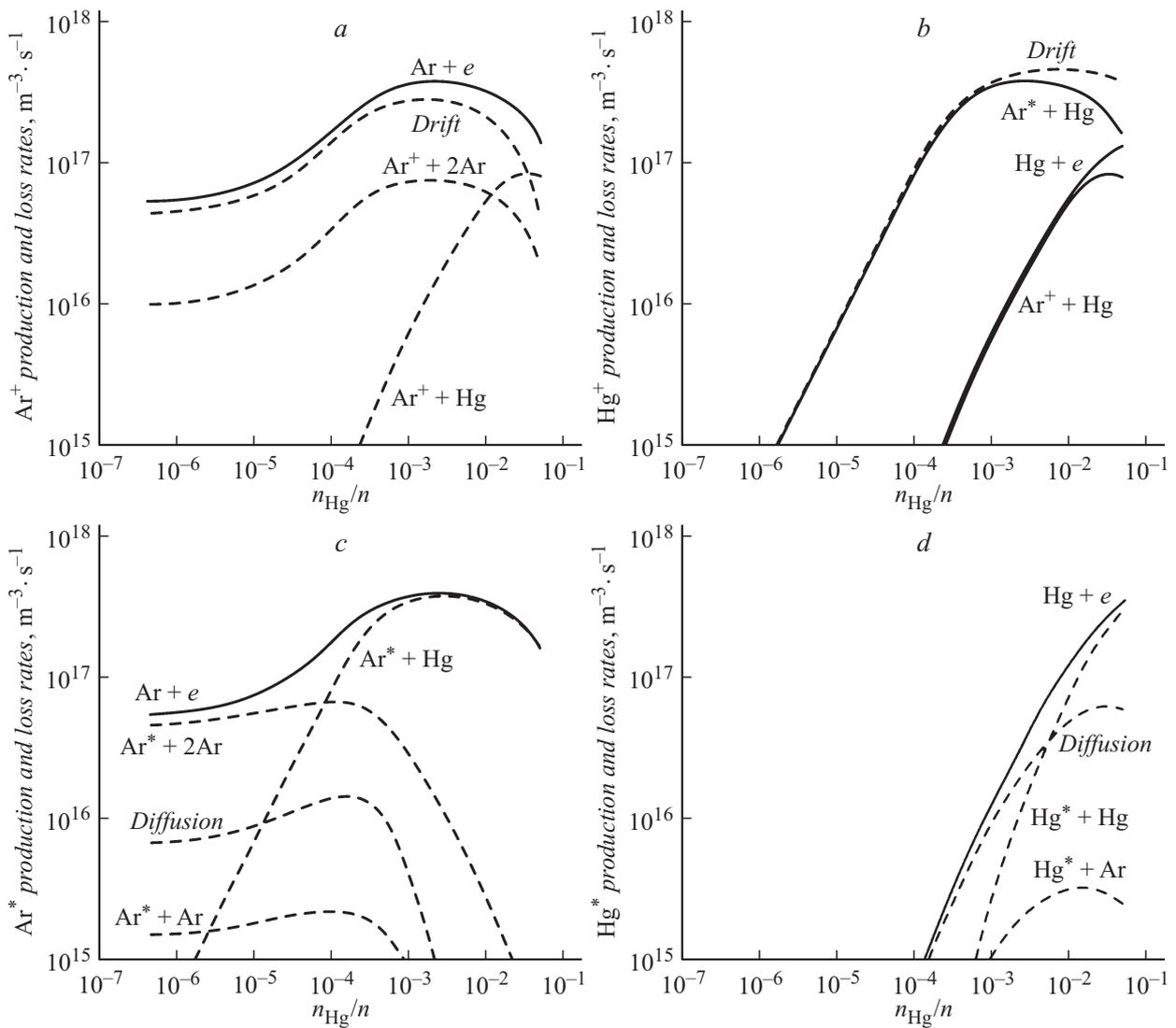
Расчитанные зависимости концентраций ионов и метастабильных атомов в центре разрядного промежутка от относительного содержания ртути в смеси приведены на рис. 4. Из него следует, что в рассмотренном интервале значений  $n_{\text{Hg}}/n$  основными типами частиц в разряде, кроме электронов, являются атомарные ионы и метастабильные возбужденные атомы компонент смеси, а концентрации молекулярных ионов имеют по крайней



**Рис. 3.** Зависимость ИК и его компонент от относительной концентрации ртути в смеси при  $E/n = 2.5 \cdot 10^{-19} \text{ V} \cdot \text{m}^{-2}$ . Линии — результаты расчета, символы  $\bullet$ ,  $\blacktriangle$  — экспериментальные значения ИК [12,13].



**Рис. 4.** Концентрации основных типов заряженных и возбужденных частиц в центре разрядного промежутка как функции относительного содержания ртути в смеси при  $E/n = 2.5 \cdot 10^{-19} \text{ V} \cdot \text{m}^{-2}$ .

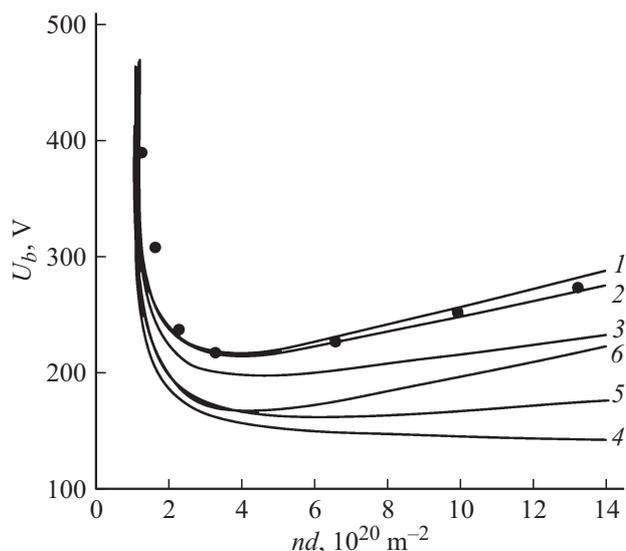


**Рис. 5.** Вклады основных механизмов образования (сплошные линии) и потерь (штриховые линии) атомарных ионов аргона (а) и ртути (b), а также метастабилей аргона (c) и ртути (d) как функции относительного содержания ртути в смеси при  $E/n = 2.5 \cdot 10^{-19} \text{ В} \cdot \text{м}^2$ .

мере на порядок меньшую величину (что согласуется с результатами работы [19]). При этом, как видно из рис. 5, на котором представлены усредненные по разрядному промежутку вклады различных механизмов их образования и потерь как функции  $n_{\text{Hg}}/n$ , атомарные ионы аргона  $\text{Ar}^+$  возникают при ионизации атомов аргона электронами, в то время как основной источник атомарных ионов ртути  $\text{Hg}^+$  при  $n_{\text{Hg}}/n < 10^{-2}$  — пеннинговская ионизация атомов ртути метастабиллями аргона, а при больших величинах  $n_{\text{Hg}}/n$  существенную роль играет также их прямая ионизация электронами и нерезонансная перезарядка ионов аргона на атомах ртути. Потери обоих типов ионов обусловлены их дрейфом к катоду под действием электрического поля, а для атомарных ионов аргона заметную роль играет также их конверсия в молекулярные ионы. Метастабилли аргона  $\text{Ar}^*$  возникают при возбуждении атомов аргона

электронами и разрушаются при  $n_{\text{Hg}}/n < 10^{-4}$  главным образом в результате их тушения при столкновениях с невозбужденными атомами аргона, а при большем содержании ртути в смеси — в процессе пеннинговской ионизации ее атомов. Метастабилли же ртути  $\text{Hg}^*$  образуются в результате возбуждения атомов ртути электронами и при  $n_{\text{Hg}}/n < 10^{-2}$  диффундируют к электродам и девозбуждаются при столкновении с их поверхностью, а при  $n_{\text{Hg}}/n > 10^{-2}$  основным механизмом их разрушения является тушение при столкновениях с невозбужденными атомами ртути. Роль всех других межчастичных взаимодействий в рассмотренном интервале значений параметров разряда незначительна.

Из рис. 1–5 следует, что при возрастании температуры смеси  $T$  до  $70^\circ\text{C}$ , обуславливающим увеличением относительной концентрации  $n_{\text{Hg}}/n$  ртути в смеси до величины  $5 \cdot 10^{-3}$ , растет интенсивность пеннинговской



**Рис. 6.** Кривые Пашена в аргоне (1) и в смеси аргон–ртуть при температуре  $-10$  (2),  $10$  (3),  $70$  (4),  $90$  (5),  $130^\circ\text{C}$  (6). Точки — экспериментальные значения  $U_b$  для разряда в аргоне [43].

ионизации атомов ртути метастабильями аргона и увеличивается концентрация электронов, а также плотность их тока. В результате увеличиваются интенсивности процессов ионизации атомов аргона и ртути и возбуждения атомов аргона на метастабильные уровни электронами, а следовательно, и интенсивность пеннинговской ионизации атомов ртути метастабильями аргона. При этом происходит рост концентрации ионов и метастабилей ртути, а также увеличение ИК смеси, в то время как концентрация метастабилей аргона снижается. В случае же более высокой температуры смеси, превосходящей  $70^\circ\text{C}$ , при ее увеличении вследствие роста концентрации ртути происходит существенное увеличение потерь энергии электронов при столкновениях с ее атомами. В результате уменьшается доля электронов, имеющих скорости, достаточные для возбуждения атомов аргона (энергетическое распределение электронов сужается [19]). Это приводит к снижению интенсивности процессов ионизации атомов аргона электронами и образованию метастабилей аргона, обуславливающему уменьшение ИК смеси.

С использованием рассчитанных значений ИК в разрядном промежутке можно найти напряжение зажигания разряда между электродами  $U_b$  из условия его поддержания [5,6]

$$\int_0^d \alpha(z, U_b/d) dz = \ln(1 + 1/\gamma_{\text{eff}}), \quad (2)$$

где  $\gamma_{\text{eff}}$  — эффективный коэффициент ионно-электронной эмиссии катода.

Вычисленные из (2) зависимости  $U_b$  от  $pd$ , где  $p$  — давление газовой смеси, (кривые Пашена) для разряда в

аргоне и его смеси с парами ртути при различных температурах приведены на рис. 6 (значение  $\gamma_{\text{eff}} = 0.0125$  выбрано из условия совпадения вычисленной величины  $U_b$  в точке минимума кривой с его экспериментальным значением для разряда в чистом аргоне, найденным в [43]). В случае разряда в аргоне эта зависимость хорошо согласуется с экспериментальной, а в смеси аргон–ртуть с увеличением температуры  $T$  до  $70^\circ\text{C}$  значение  $U_b$  убывает, а при дальнейшем ее повышении возрастает, что обусловлено немонотонной зависимостью ИК смеси  $\alpha$  от  $n_{\text{Hg}}/n$  (рис. 3) и согласуется с экспериментальными результатами [10,12].

## Заключение

В настоящей работе проведено моделирование кинетики основных типов заряженных и возбужденных частиц в слаботоочном разряде в смеси аргон–ртуть, используемой в газоразрядных осветительных лампах. Рассчитанные зависимости ИК от приведенной напряженности электрического поля в чистых аргоне и ртути и их смеси, а также зависимость ИК смеси от относительного содержания ртути в ней, удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

Найдены температурные зависимости вкладов различных механизмов образования и потерь ионов и метастабильных атомов в поддержание их баланса. Установлено, что основным механизмом образования атомарных ионов аргона является ионизация атомов аргона электронами, а атомарные ионы ртути образуются, главным образом, при пеннинговской ионизации атомов ртути метастабильями аргона. Потери же ионов обоих типов обусловлены преимущественно их дрейфом к катоду под действием электрического поля. Метастабилей аргона и ртути образуются при возбуждении атомов аргона и ртути электронами, а разрушаются первые из них при пеннинговской ионизации атомов ртути, а вторые — в результате их тушения при столкновениях с невозбужденными атомами и диффузии к электродам. Влияние же всех других процессов на концентрации основных типов частиц, по крайней мере, на порядок меньше. Показано, что возрастание ИК в смеси аргон–ртуть по сравнению с чистым аргонem практически полностью обусловлено реакцией Пеннинга, причем ее роль увеличивается с уменьшением напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке.

Рассчитаны также зависимости напряжения зажигания разряда от межэлектродного расстояния (кривые Пашена) при различных температурах смеси и дано объяснение немонотонной зависимости его величины от температуры.

Полученные результаты могут быть использованы для оценки влияния состава газовой смеси и эмиссионных свойств электродов на напряжение зажигания разряда в ртутных осветительных лампах.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ, а также в рамках реализации государственного задания „Организация проведения научных исследований“ Минобрнауки РФ в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

## Список литературы

- [1] Zissis G., Kitsinelis S. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. Vol. 42. N 17. P. 173001.
- [2] Samukawa S. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2012. Vol. 45. N 25. P. 253001.
- [3] Schwieger J., Baumann B., Wolff M., Manders F., Suijker J. // J. Phys. Conf. Series. 2015. Vol. 655. P. 012045.
- [4] Lister G.G., Lawler J.E., Lapatovich W.P., Godyak V.A. // Rev. Mod. Phys. 2004. Vol. 76. N 2. P. 541–598.
- [5] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Долгопрудный: Издат. Дом Интеллект, 2009. 736 с.
- [6] Кудрявцев А.А., Смирнов А.С., Цендин Л.Д. Физика тлеющего разряда. СПб.: Лань, 2010. 512 с.
- [7] Byszewski W.W., Li Y.M., Budinger A.B., Gregor P.D. // Plasm. Sourc. Sci. Technol. 1996. Vol. 5. N 4. P. 720–735.
- [8] Hadrath S., Beck M., Garner R.C., Lieder G., Ehlbeck J. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. Vol. 40. N 1. P. 163–167.
- [9] Brok W.J.M., Gendre M.F., van der Mullen J.J.A.M. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. Vol. 40. N 1. P. 156–162.
- [10] Sobota A., van den Bos R.A.J.M., Kroesen G., Manders F. // J. Appl. Phys. 2013. Vol. 113. N 4. P. 043308.
- [11] Burgmans A.L.J., Smeets A.H.M. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1983. Vol. 16. N 5. P. 755–762.
- [12] Атаев А.Е. Зажигание ртутных разрядных источников излучения высокого давления. М.: МЭИ, 1995. 168 с.
- [13] Sawada S., Sakai Y., Tagashira H. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1989. Vol. 22. N 2. P. 282–288.
- [14] Миленин В.М., Тимофеев Н.А. Плазма газоразрядных источников света низкого давления. Л.: ЛГУ, 1991. 240 с.
- [15] Zissis G., Bénétroy P., Bernat I. // Phys. Rev. A. 1992. Vol. 45. N 2. P. 1135–1148.
- [16] Bashlov N., Zissis G., Charrada K., Stambouli M., Milenin V., Timofeev N. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1994. Vol. 27. N 3. P. 494–503.
- [17] Petrov G.M., Giuliani J.L. // J. Appl. Phys. 2003. Vol. 94. N 1. P. 62–75.
- [18] Ben Hamida M.B., Helali H., Araoud Z., Charrada K. // Phys. Plasmas. 2011. Vol. 18. N 6. P. 063506.
- [19] Lay B., Moss R.S., Rauf S., Kushner M.J. // Plasma Sourc. Sci. Technol. 2003. Vol. 12. N 1. P. 8–21.
- [20] Мокров М.С., Райзер Ю.П. // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 4. С. 47–54.
- [21] Богданов Е.А., Кудрявцев А.А., Чирцов А.С. // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 1. С. 59–64.
- [22] Eylenceoğlu E., Rafatov I., Kudryavtsev A.A. // Phys. Plasmas. 2015. Vol. 22. N 1. P. 013509.
- [23] Rockwood S.D. // Phys. Rev. A. 1973. Vol. 8. N 5. P. 2348–2358.
- [24] Phelps A.V. <http://jilawww.colorado.edu/~avp/>
- [25] Human H.A. // Phys. Rev. A. 1979. Vol. 20. N 3. P. 855–859.
- [26] Bogaerts A., Gijbels R. // Phys. Rev. A. 1995. Vol. 52. N 5. P. 3743–3751.
- [27] Bogaerts A., Gijbels R. // J. Appl. Phys. 1999. Vol. 86. N 8. P. 4124–4133.
- [28] Lymberopoulos D.P., Economou D.J. // J. Appl. Phys. 1993. Vol. 73. N 8. P. 3668–3679.
- [29] Sakai Y., Sawada S., Tagashira H. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1989. Vol. 22. N 2. P. 276–281.
- [30] Wamsley R.C., Mitsuhashi K., Lawler J.E. // Phys. Rev. E. 1993. Vol. 47. N 5. P. 3540–3546.
- [31] Biondi M.A. // Phys. Rev. 1953. Vol. 90. N 5. P. 730–737.
- [32] Крюков Н.А., Пенкин Н.П., Редько Т.П. // Опт. и спектр. 1977. Т. 42. № 1. С. 33–41.
- [33] Schlie L.A., Jusinski L.E., Rathge R.D., Drummond D.L., Hamil R.A. // J. Appl. Phys. 1980. Vol. 51. N 6. P. 3137–3143.
- [34] Moody S.E., Center R.E. // J. Appl. Phys. 1984. Vol. 55. N 7. P. 2721–2725.
- [35] Крестя В.И., Фишер М.Р. // Изв. РАН. Сер. физ. 2010. Т. 74. № 2. С. 298–301.
- [36] Крестя В.И., Фишер М.Р. // Изв. РАН. Сер. физ. 2012. Т. 76. № 5. С. 673–677.
- [37] Bondarenko G.G., Fisher M.R., Kristya V.I. // J. Phys. Conf. Ser. 2012. Vol. 406. P. 012031.
- [38] Donkó Z. // Plasma Sourc. Sci. Technol. 2011. Vol. 20. N 2. P. 024001.
- [39] Таблицы физических величин / Под ред. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1006 с.
- [40] Chanin L.M., Biondi M.A. // Phys. Rev. 1957. Vol. 107. N 5. P. 1219–1221.
- [41] Kucukarpaci H.N., Lucas J. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1981. Vol. 14. N 11. P. 2001–2014.
- [42] Garamoon A.A., Abdelhaleem A.S. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1979. Vol. 12. N 12. P. 2181–2187.
- [43] Lisovskiy V.A., Yakovin S.D., Yegorenkov V.D. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2000. Vol. 33. N 21. P. 2722–2730.