

## О влиянии магнитного поля на диффузию и дрейф электронов в аргоне

*Р. И. Голятина, С. А. Майоров*

*В работе представлены результаты расчетов характеристик дрейфа электронов в аргоне для случая постоянного и однородного электрического и магнитного полей. Приведенные напряженности электрического поля 10, 30, 100 Тд, при индукции магнитного поля до 10 Тл при плотности газа  $10^{17}$  атомов в  $\text{см}^3$  представляют основной интерес для физики газоразрядной плазмы во многих приложениях. Рассмотрено влияние как продольного, так и поперечного магнитного поля на основные характеристики дрейфа, включая неупругие процессы. Приведены результаты расчетов энергобаланса электронов и показано, что с увеличением поперечного магнитного поля неупругие процессы подавляются, а средняя энергия при этом уменьшается незначительно (для  $10 < E/N < 100$  Тд). Проанализированы основные закономерности изменения коэффициентов продольной и поперечной диффузии в зависимости от параметра Холла. Для случая поперечного магнитного поля исследована зависимость тока Холла от силы магнитного поля. Проведено сравнение с известными аналитическими оценками скорости дрейфа и коэффициентов диффузии.*

*Ключевые слова:* аргон, дрейф электронов, коэффициент диффузии, магнитное поле, частота столкновений, параметр Холла, угол Лоренца, подвижность электронов, ионизация.

**Ссылка:** Голятина Р. И., Майоров С. А. // Прикладная физика. 2020. № 4. С. 32.

**Reference:** R. I. Golyatina and S. A. Maiorov, Prikl. Fiz., No. 4, 32 (2020).

### Введение

Диффузия и дрейф электронов в газах очень хорошо изучены [1–3], но имеется потребность в табулированных данных характеристик дрейфа для конкретных газов. В работах [4, 5] выполнена детальная табуляция различных дрейфовых характеристик элект-

тронов в постоянном и однородном электрическом поле, в работах [6, 7] исследовано влияние степени неоднородности на характеристики дрейфа. В настоящей работе приводятся характеристики дрейфа электронов в аргоне при наличии продольного или поперечного магнитного поля, полученные методом численного моделирования [4–8].

Вообще говоря, проведение полной табуляции характеристик дрейфа электронов в газе затруднительно из-за зависимости решения от многих параметров задачи: сорт, давление и температура газа, напряженность электрического поля, величина индукции магнитного поля, а также угол между ними. Но имея в виду различные приложения физики газового разряда, в настоящей работе в качестве рабочего газа выбран аргон при температуре 300 К и рассмотрены случаи параллельного и перпендикулярного направлений полей. Расчеты сделаны для трех значе-

---

Голятина Русудан Игоревна<sup>1</sup>, н.с.

Майоров Сергей Алексеевич<sup>1,2,3</sup>, в.н.с.

<sup>1</sup> Институт общей физики имени А. М. Прохорова  
Российской академии наук.

Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

E-mail: mayorov\_sa@mail.ru

<sup>2</sup> Объединенный институт высоких температур РАН.  
Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

<sup>3</sup> НИИЭТФ Казахский Национальный Университет  
им. аль-Фараби.

Казахстан, 050040, Алматы, пр. ал-Фараби, 71.

Статья поступила в редакцию 26 августа 2020 г.

ний приведенной напряженности электрического поля 10, 30 и 100 Тд, которые соответствуют случаям слабого, среднего и сильного полей с точки зрения влияния неупругих процессов возбуждения и ионизации на энергобаланс [4–11].

Решение задачи о движении заряда в постоянном и однородном электрическом и магнитном полях при отсутствии столкновений известно и представляет собой циклоиду [1–3]. При дрейфе электронов в газе столкновения с атомами оказывают сильное влияние на траекторию движения. Даже при отсутствии магнитного поля характеристики дрейфа могут быть получены только для некоторых частных случаев. Например, при степенной зависимости сечения от энергии столкновения, в пренебрежении зависимостью от температуры газа и полагая рассеяние изотропным в системе центра масс, получены выражения для функций распределения, скорости дрейфа и коэффициентов диффузии [1–3].

Но даже в случае одноатомных благородных газов сечения упругих столкновений могут сильно и немонотонно зависеть от энергии столкновения (эффект Рамзауэра для аргона, криптона и ксенона), да и само рассеяние обычно сильно неизотропно. Кроме того, физика газового разряда предполагает определяющее влияние неупругих процессов – ионизации, возбуждения и т. д. Все эти факторы приводят к необходимости получения справочной информации о характеристиках дрейфа для реальных газов.

Наличие магнитного поля значительно усложняет физическую картину дрейфа электронов, и в литературе очень мало соответствующей справочной информации. В настоящей работе мы попытаемся восполнить этот пробел, приведя данные для аргона, который является одним из распространенных рабочих газов.

### Постановка задачи

Влияние поля на дрейф электронов в газе при заданной температуре определяется не только величиной его напряженности, но и плотностью газа. Однако, распределение электронов по скоростям может быть определено только по одному параметру, отношению

напряженности поля к плотности атомов. Это относится как к электрическому, так и к магнитному полям. Поэтому при табуляции характеристик дрейфа используется значение приведенного электрического поля  $E/N$ , для измерения которого служит внесистемная единица, названная в честь Таунсенда. Один таунсенд соответствует напряженности электрического поля 1 В/см при плотности атомов  $10^{17}/\text{см}^3$  ( $1 \text{ Тд} = 10^{-17} \text{ В см}^2$ ). Влияние магнитного поля на характеристики дрейфа также определяется значением отношения  $B/N$ , которое можно назвать приведенной индукцией магнитного поля. Тогда, по аналогии с приведенным электрическим полем, удобно использовать величину приведенного магнитного поля  $B/N$ , и в качестве ее единицы положить значение индукции магнитного поля в 1 Гаусс при числовой плотности атомов  $10^{17} \text{ в см}^3$ .

За счет джоулева нагрева при дрейфе в постоянном и однородном электрическом поле в единицу времени электрон приобретает в среднем энергию  $Q_{EW} = eEW$ , здесь  $e$  – заряд электрона,  $E$  – напряженность электрического поля,  $W$  – скорость дрейфа в направлении электрического поля. Энергия, получаемая электроном от электрического поля, теряется в упругих столкновениях с атомами, затрачивается на возбуждение атомных уровней и ионизацию, кроме того электроны уносят или приобретают энергию при рекомбинации:  $Q_{EW} = Q_{ea} + Q_{ex} + Q_{ion} + Q_{rec}$ . Здесь в правой части представлены соответствующие средние энергопотери одного электрона за единицу времени (при рекомбинации электрон может и приобретать энергию, например, при тройной рекомбинации). В приведенных ниже расчетах пренебрегалось влиянием процессов рекомбинации на энергобаланс электронов, т. е. полагалось, что  $Q_{rec} = 0$ . Кроме того, в рассмотренных случаях энергия электронов значительно превышает энергию атомов, и в упругих столкновениях электроны преимущественно теряют энергию. Для анализа энергобаланса определялась доля энерговклада от электрического поля, пошедшая на упругие потери в газ –  $Q_{ea} / Q_{EW}$ , доля на возбуждение –  $Q_{ex} / Q_{EW}$ , и доля в ионизацию –  $Q_{ion} / Q_{EW}$ .

Еще Таунсендом в 1915 году путем анализа экспериментальных данных было обнаружено, что коэффициент диффузии в направ-

лении, нормальном магнитному полю равен [1–3]:

$$D_{\perp} = D_0 / (1 + \omega^2 \tau_{st}^2), \quad (1)$$

где  $\omega = eB/m$  – циклотронная частота,  $v_m = 1/\tau_{st}$  – эффективная частота столкновений. Здесь  $D_0$  – коэффициент поперечной диффузии при отсутствии магнитного поля (явление анизотропии диффузии электронов было обнаружено экспериментально только в 1967 г., а до этого подразумевалось, что коэффициенты продольной и поперечной диффузии совпадают из-за практически изотропного распределения электронов по скоростям). Для продольной и поперечной компонент скорости дрейфа им были получены выражения [1–3]:

$$W_{\parallel} = \frac{eE}{m} \frac{\tau_{st}}{1 + \omega^2 \tau_{st}^2}, \quad (2)$$

$$W_{\perp} = \frac{eE}{m} \frac{\omega \tau_{st}^2}{1 + \omega^2 \tau_{st}^2}. \quad (3)$$

В соответствии с этими формулами угол отклонения электронного потока от направления электрического поля определяется соотношением  $\operatorname{tg} \theta = \omega \tau_{st} \equiv \beta_H$ .

При наличии магнитного поля степень его влияния на характеристики дрейфа обычно связывается с величиной параметра Холла  $\beta_H = \omega/v_m$ , поскольку значение  $\beta_H \approx 1$  определяет границу между слабыми и сильными магнитными полями. В пределе сильного магнитного поля дрейф происходит в направлении, ортогональном направлениям электрического и магнитного полей (угол Лоренца  $\theta \rightarrow \pi/2$ ) и не зависит ни от знака и величины заряда, ни от его массы, и равен

$$W_{E \times B} = \frac{c[E \times B]}{B^2}, \quad (4)$$

где  $c$  – скорость света.

Рассмотрим систему координат, в которой ось абсцисс  $x$  направлена вдоль электрического поля, ось ординат  $y$  лежит в плоскости  $E$  и  $B$ . У вектора  $B$  выделим компоненту в про-

екции на ось  $x$  –  $B_{\parallel}$  и компоненту  $B_{\perp}$ , перпендикулярную направлению электрического поля, т. е. в направлении оси  $y$ .

### Результаты расчетов

Рассмотрим вначале случай, когда направление магнитного и электрического полей совпадают. Поскольку магнитное поле не меняет кинетическую энергию электрона, то наличие магнитного поля не будет влиять на характеристики движения вдоль оси  $x$ . Соответственно, электрический  $[E \times B]$  дрейф (ток Холла), в этом случае отсутствует, поэтому из всех характеристик дрейфа при наложении продольного магнитного поля меняется только коэффициент поперечной диффузии.

На рис. 1 приведены зависимости полученных в результате вычислительного эксперимента коэффициентов диффузии вдоль осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$  от силы продольного магнитного поля при значении приведенной напряженности электрического поля 10 Тд. Отличие значений коэффициентов диффузии по оси  $x$  от константы показывает уровень статистической погрешности, также как и различие между коэффициентами диффузии по осям  $y$  и  $z$ . Приведенная на графике оценка коэффициента поперечной диффузии (2) совпадает с результатами расчетов с точностью значительно лучше 1 % при сильных полях. Но в области перехода от слабого к сильному магнитному полю в области  $\beta_H \approx 1$  оценка Таунсенда дает завышенное на 70 % значение, что очевидно обусловлено совпадением периода ларморовой орбиты со временем между столкновениями для некоторых электронов.

В таблицах 1–3 приведены результаты расчетов характеристик дрейфа электронов при различных приведенных напряженностях электрического поля  $E/N = 10, 30, 100$  Тд. Первая строка табличных данных – результат без магнитного поля. Первый столбец – величина индукции магнитного поля, отнесенная к плотности атомов  $10^{17} / \text{см}^3$ . Все следующие 10 столбцов – значения характеристик дрейфа для случая магнитного поля, направленного по оси  $y$  (ортогонально электрическому полю). Последний столбец – значения коэффициента

поперечной диффузии для случая, когда направления электрических и магнитных полей совпадают. Как уже сказано выше, в этом случае от силы магнитного поля зависит только диффузия в поперечном направлении, зна-

чения коэффициента которой и приведены в данном столбце. Все коэффициенты диффузии в таблице представлены в виде произведения коэффициента диффузии на числовую плотность атомов в единицах  $10^{22} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ .

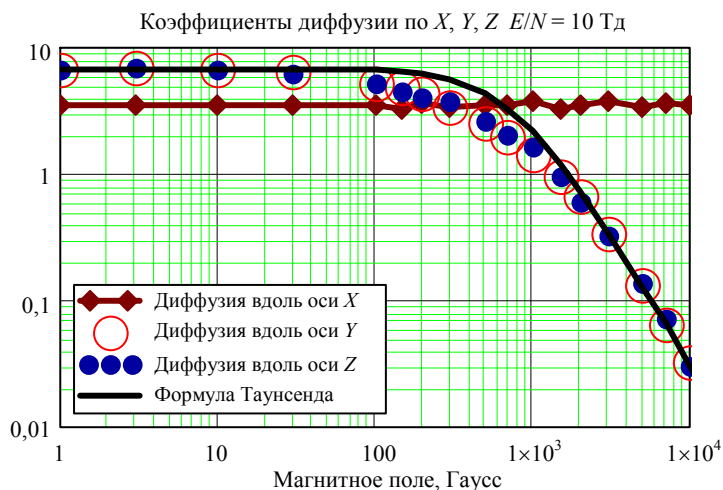


Рис. 1. Зависимость коэффициентов диффузии от силы продольного магнитного поля при E/N = 10 Тд.

Таблица 1

**Характеристики дрейфа электронов в аргоне для приведенного электрического поля E/N = 10 Тд в зависимости от индукции продольного и поперечного магнитных полей**

B, Gauss	V <sub>x</sub> km/s	V <sub>z</sub> km/s	D <sub>x</sub> *N	D <sub>y</sub> *N	D <sub>z</sub> *N	<ε> eV	β <sub>H</sub>	Elastic part	Excit. part	Ioniz. part	D <sub>y</sub> *N
0	9,81	0	3,54	6,86	6,86	5,38	0	0,249	0,750	0,001	6,86
10	9,78	0,24	3,46	7,13	7,24	5,31	0,02	0,246	0,752	0,001	6,86
30	9,58	0,98	3,51	6,83	7,21	5,37	0,04	0,250	0,748	0,001	6,51
100	9,80	2,44	3,41	7,85	7,10	5,29	0,15	0,243	0,757	0	5,08
300	8,29	5,54	2,48	8,41	5,80	4,89	0,49	0,267	0,733	0	3,43
1000	3,36	6,60	0,90	10,90	1,30	3,52	2,49	0,351	0,649	0	1,45
3000	0,54	3,16	0,11	10,30	0,08	2,83	11,3	0,975	0,025	0	0,33
10000	0,05	0,98	0,01	9,03	0,01	3,08	34,9	1,0	0	0	0,03

Таблица 2

**E/N = 30 Тд**

B <sub>y</sub> , B <sub>x</sub> , Gauss	V <sub>x</sub>	V <sub>z</sub>	D <sub>x</sub> *N	D <sub>y</sub> *N	D <sub>z</sub> *N	<ε>, eV	β <sub>H</sub>	Elastic part	Excit. part	Ioniz. part	D <sub>y</sub> *N
0	26,1	0	3,33	6,26	6,26	6,13	0	0,048	0,830	0,122	6,26
10	26,1	0,50	3,35	6,26	6,05	6,14	0,01	0,048	0,832	0,120	6,26
30	26,2	1,23	3,29	6,26	5,90	6,17	0,04	0,049	0,834	0,117	6,15
100	25,8	4,17	3,30	6,84	7,00	6,09	0,13	0,048	0,829	0,123	5,00
300	22,1	13,70	2,54	8,57	7,18	5,57	0,42	0,049	0,844	0,107	3,75
1000	9,6	19,30	1,30	11,50	2,13	3,71	2,28	0,061	0,842	0,098	1,72
3000	1,5	9,39	0,16	13,00	0,13	2,54	11,8	0,150	0,840	0,010	0,46
10000	0,3	2,96	0,02	8,88	0,02	3,94	23,0	0,825	0,175	0	0,04

Таблица 3

 $E/N = 100 \text{ Тд}$ 

$B_y, B_x,$ Gauss	$V_x$	$V_z$	$D_x * N$	$D_y * N$	$D_z * N$	$\langle \varepsilon \rangle,$ eV	$\beta_H$	Elastic part	Excit. part	Ioniz. part	$D_y * N$
0	73,4	0	3,58	5,56	5,56	7,76	0	0,080	0,417	0,503	5,56
10	73,4	1,26	3,53	5,64	5,19	7,75	0,01	0,081	0,416	0,503	5,56
30	73,6	2,14	3,54	5,62	5,46	7,75	0,03	0,080	0,413	0,507	5,45
100	73,0	7,73	3,55	5,25	5,31	7,74	0,10	0,081	0,415	0,503	5,37
300	67,0	28,70	3,05	6,35	6,51	7,39	0,32	0,079	0,416	0,505	4,02
1000	32,5	56,50	2,06	9,60	4,37	4,96	1,63	0,068	0,458	0,474	2,13
3000	4,9	31,40	0,46	13,60	0,23	2,66	10,2	0,048	0,647	0,305	0,61
10000	0,5	9,96	0,02	13,30	0,01	2,63	37,3	0,130	0,842	0,028	0,07

В большей части справочников и книг приводятся лишь скорость дрейфа электронов и наблюдаемая в экспериментах величина  $eD_{\perp} / \mu$ , называемая также характеристической энергией Таунсенда. В случае максвелловского распределения характеристическая энергия Таунсенда совпадает с температурой электронов. Но для реальных распределений электронов по энергии соответствия между средней энергией электронов и значением характеристической энергии Таунсенда нет, поэтому в таблице приведены значения только средней энергии электронов  $\langle \varepsilon \rangle = \int_0^{\infty} \varepsilon f(\varepsilon) d\varepsilon$  (более подробно см. [4]).

Графики зависимостей, иллюстрирующие основные особенности влияния попереч-

ного магнитного поля на характеристики дрейфа приведены на рис. 2 и 3.

На рис. 2 приведены графики зависимостей, иллюстрирующие особенности энергетического баланса электронов – показаны доли потерь в упругих столкновениях, потери на возбуждение и ионизацию.

На рис. 3 приведены графики, иллюстрирующие зависимость кинетических характеристик дрейфа электронов в скрещенных полях: а) скорости дрейфа в направлении электрического поля и поперек него; б) коэффициенты диффузии по всем трем выделенным направлениям: вдоль электрического поля, вдоль магнитного поля и ортогонально к этим направлениям. Там же нанесены аппроксимации Таунсенда.

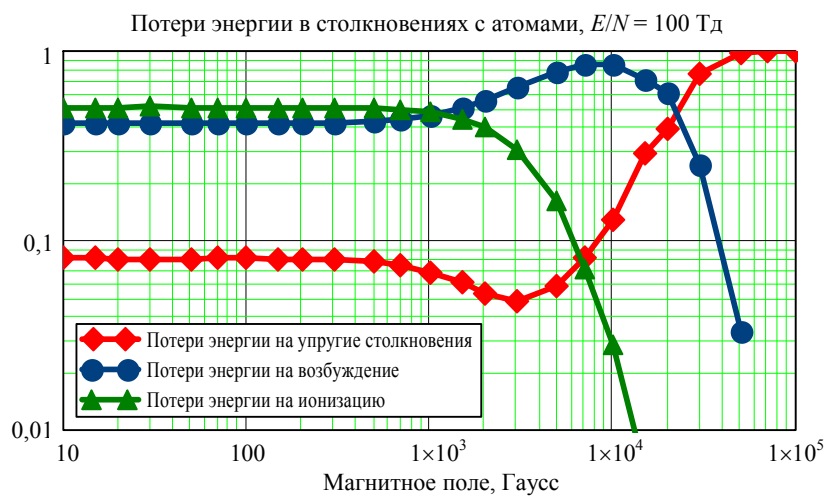


Рис. 2. Зависимость доли потерь энергии электронов в упругих столкновениях с атомами аргона на возбуждение и ионизацию в зависимости от индукции поперечного магнитного поля при  $E/N = 100 \text{ Тд}$ .

Рис. 3. Зависимость от величины индукции поперечного магнитного поля при  $E/N = 100$  Тд; а) скорости дрейфа в направлении электрического поля и поперек него; б) коэффициенты диффузии в направлении электрического, магнитного и перпендикулярного им направлениях (оси  $x, y, z$ , соответственно).

**Выводы**

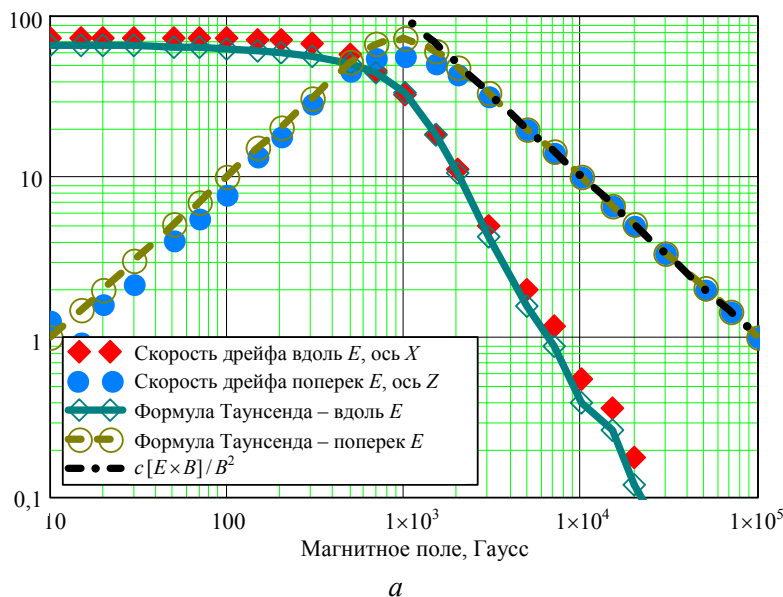
В работе представлены результаты расчетов характеристик дрейфа электронов в аргоне в постоянном и однородном электрическом и магнитном полях. Рассмотрены случаи параллельного и скрещенного направлений полей для значений приведенной напряженности электрического поля 10, 30, 100 Тд при индукции магнитного поля до 10 Тл при плотности газа  $10^{17}$  атомов в  $см^3$ . Такие значения параметров задачи представляют основной интерес для физики газоразрядной плазмы во многих приложениях.

Исследовано влияние как продольного, так и поперечного магнитного поля на основные характеристики дрейфа, включая неупругие процессы. Приведены результаты расчетов энергобаланса электронов, выделены доли энергии, теряемые электроном в упругих соударениях с атомами, на возбуждение и ионизацию.

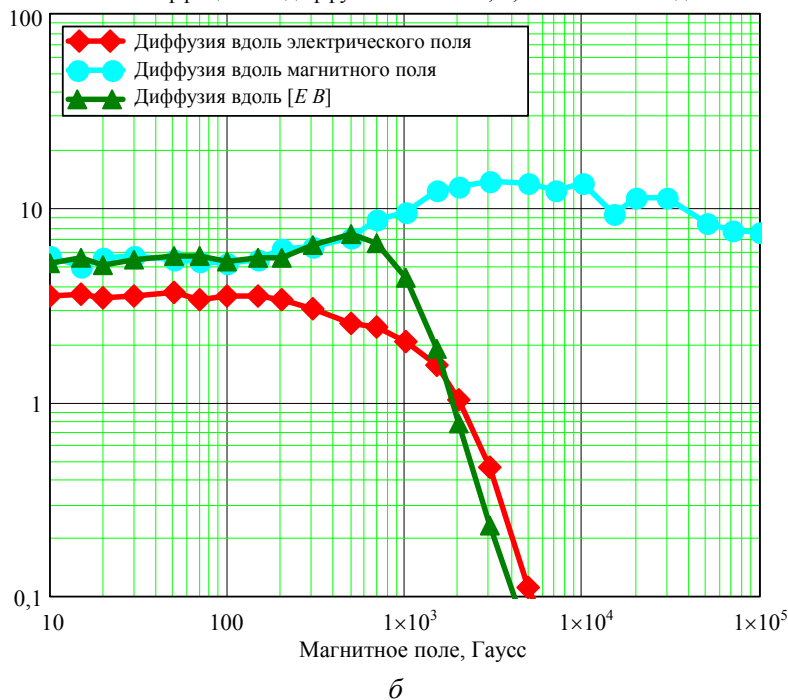
Для случая параллельных полей показано, что формула Таунсенда для коэффициента поперечной диффузии дает завышенные до 70 % значения в области перехода от слабого к сильному магнитному полю.

В случае скрещенных полей с увеличением магнитного поля неупругие процессы подавляются, в результате этого средняя энергия электронов уменьшается незначительно (для  $10 < E/N < 100$  Тд), хотя мощность джоулева нагрева падает сильно из-за уменьшения скорости дрейфа в направлении электрическо-

Скорость дрейфа в направлении электрического поля и поперек него  $E/N = 100$  Тд



Коэффициенты диффузии по осям  $X, Y, Z$   $E/N = 100$  Тд



го поля. С увеличением индукции магнитного поля также пропадает анизотропия диффузии.

Проанализированы основные закономерности изменения коэффициентов продольной и поперечной диффузии в зависимости от параметра Холла. Для случая поперечного магнитного поля исследована зависимость тока Холла от силы магнитного поля. Проведено сравнение с известными аналитическими оценками скорости дрейфа и коэффициентов диффузии.

*Работа выполнена при финансовой поддержке  
Российского Фонда Фундаментальных  
Исследований, проект 19-08-00611.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Хаксли Л., Кромптон Р. Диффузия и дрейф электронов в газах. – М.: Мир, 1977.
2. Биберман Л. М., Воробьев В. С., Якубов И. Т. Кинетика неравновесной плазмы. – М.: Наука, 1982.
3. Бэдселл Ч., Ленгдон А. Физика плазмы и численное моделирование. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
4. Майоров С. А. Расчет характеристик дрейфа электрона в неоне при постоянном электрическом поле // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2009. Т. 36. № 10. С. 29.
5. Голятина Р. И., Майоров С. А. Характеристики дрейфа электрона в постоянном электрическом поле для инертных газов // Прикладная физика. 2011. № 5. С. 22.
6. Майоров С. А. О распределении электронов по энергии в положительном столбе газового разряда – парадокс Ленгмюра // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2013. № 9. С. 22.
7. Kodanova S. K., Bastikova N. Kh., Ramazanov T. C., Maiorov S. A. Drift of electrons in gas in spatially inhomogeneous periodic electric field // Ukrainian Journal of Physics. 2014. Vol. 59. № 4. P. 371.
8. Майоров С. А. О дрейфе ионов во внешнем электрическом поле // Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 9. С. 869.
9. Майоров С. А. Коэффициенты переноса электронов в смеси гелия с ксеноном // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2014. Т. 41. № 10. С. 20.
10. Golyatina R. I., Maiorov S. A. Characteristics of Electron Drift in an Ar–Hg Mixture // Plasma Physics Reports. 2018. Vol. 44. № 4. P. 453.
11. Petrović Z. Lj., Dujko S., Marić D., Malović G., Nikitović Z., Sasić O., Jovanović J., Stojanović V., Radmilović-Radenović M. Measurement and interpretation of swarm parameters and their application in plasma modelling // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. Vol. 42. P. 194002. doi:10.1088/0022-3727/42/19/194002

PACS: 51.50.+v, 51.10.+y, 52.80.Dy, 52.25.Fi

## Effect of Magnetic Field on Diffusion and Drift of Electrons in Argon

*R. I. Golyatina<sup>1</sup> and S. A. Maiorov<sup>1,2,3</sup>*

<sup>1</sup> Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences  
38 Vavilov st., Moscow, 119991, Russia

<sup>2</sup> Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences  
Bld. 2, 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia

<sup>3</sup> Institute of Experimental and Theoretical Physics, Al-Farabi Kazakh National University  
71 Al-Farabi Ave., Almaty, 050040, Kazakhstan

*Received August 26, 2020*

*The paper presents the results of calculations of the characteristics of electron drift in argon for the case of constant and uniform electric and magnetic fields. The reduced electric field strengths of 10, 30, 100 Td, with a magnetic field induction of up to 10 T and a gas density of  $10^{17}$  atoms per  $\text{cm}^3$ , are of primary interest for the physics of gas-discharge plasma in many applications. The influence of both longitudinal and transverse magnetic fields on the main characteristics of the drift, including inelastic processes, is considered. The results of calculations of the energy balance of electrons are presented and it is shown that with an increase in the transverse magnetic field, inelastic processes are suppressed, and the average energy decreases insignificantly (for  $10 < E/N < 100$  Td). The main regularities of changes in the longitudinal and transverse diffusion coefficients are analyzed depending on the Hall parameter. For the case of a transverse magnetic field, the dependence of the Hall current on the magnet-*

***ic field strength is investigated. A comparison is made with known analytical estimates of the drift velocity and diffusion coefficients.***

**Keywords:** argon, electron drift, diffusion coefficient, magnetic field, collision frequency, Hall parameter, Lorentz angle, electron mobility, ionization.

## REFERENCES

1. G. H. Huxley and R. W. Crompton, *The Diffusion and Drift of Electrons in Gases* (New York, N. Y., 1974; Mir, Moscow, 1977).
2. L. M. Biberman, V. S. Vorob'ev, and I. T. Yakubov, *Kinetics of Nonequilibrium Plasma* (Nauka, Moscow, 1982) [in Russian].
3. Charles K. Birdsall and A. Bruce Langdon, *Plasma Physics, via Computer Simulation* (McGraw-Hill Book Company, 1985).
4. S. A. Mayorov, *Calculation of Characteristics of Electron Drift in Neon under a DC Electric Field*, Bulletin of the Lebedev Physics Institute **36** (10), 299 (2009).
5. R. I. Golyatina and S. A. Mayorov, *Characteristics of the electron drift in a dc field for inert gases*, Prikl. Fiz., No. 5, 22 (2011).
6. S. A. Mayorov, *On the Electron Energy Distribution in the Gas Discharge Positive Column: Langmuir Paradox*, Bulletin of the Lebedev Physics Institute **40** (9), 22 (2012).
7. S. K. Kodanova, N. Kh. Bastikova, T. S. Ramazanov, and S. A. Maiorov, *Drift of electrons in gas in spatially inhomogeneous periodic electric field*, Ukrainian Journal of Physics **59** (4), 371 (2014).
8. S. A. Maiorov, *Ion Drift in a Gas in an External Electric Field*, Plasma Physics Reports **35** (9), 802 (2009).
9. S. A. Mayorov, *Electron Transport Coefficients in a Helium–Xenon Mixture*, Bulletin of the Lebedev Physics Institute **41** (10), 20 (2014).
10. R. I. Golyatina and S. A. Maiorov, *Characteristics of Electron Drift in an Ar–Hg Mixture*, Plasma Physics Reports **44** (4), 453 (2018).
11. Z. Lj. Petrovic', S. Dujko, D. Mari', G. Malovi', Z. Nikitovi', O. Sasic, J. Jovanovic, V. Stojanovic, and M. Radmilovic-Radenovic, *Measurement and interpretation of swarm parameters and their application in plasma modelling*, J. Phys. D: Appl. Phys. **42**, 194002 (2009). doi:10.1088/0022-3727/42/19/194002