



Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

A. G. Khrapak, R. I. Golyatina, S. A. Mayorov, S. A. Khrapak, Approximation of the mobility of atomic ions of noble gases in their parent gas, *TVT*, 2020, Volume 58, Issue 4, 590–595

DOI: 10.31857/S0040364420040067

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use

<http://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.9.172

February 15, 2025, 20:47:11



## АППРОКСИМАЦИЯ ПОДВИЖНОСТИ АТОМАРНЫХ ИОНОВ БЛАГОРОДНЫХ ГАЗОВ В СОБСТВЕННОМ ГАЗЕ

© 2020 г. А. Г. Храпак<sup>1, \*</sup>, Р. И. Голятина<sup>2</sup>, С. А. Майоров<sup>2, \*\*</sup>, С. А. Храпак<sup>1, 3</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Institut für Materialphysik im Weltraum DLR, Weßling, Germany

\*E-mail: khrapak@mail.ru

\*\*E-mail: mayorov\_sa@mail.ru

Поступила в редакцию 04.03.2020 г.

После доработки 10.03.2020 г.

Принята к публикации 10.03.2020 г.

При теоретическом анализе многих явлений в низкотемпературной плазме, таких как амбиполярная диффузия, образование приэлектродных и приповерхностных слоев в газовых разрядах, зарядка и ионное увлечение пылевых частиц, важную роль играет подвижность ионов. В работе предлагается модификация полуэмпирической формулы Фроста для подвижности положительных атомарных ионов в собственных газах. Модифицированное выражение демонстрирует превосходное согласие с экспериментальными результатами для различных ионизованных инертных газов в очень широком диапазоне напряженностей электрического поля и температур.

DOI: 10.31857/S0040364420040067

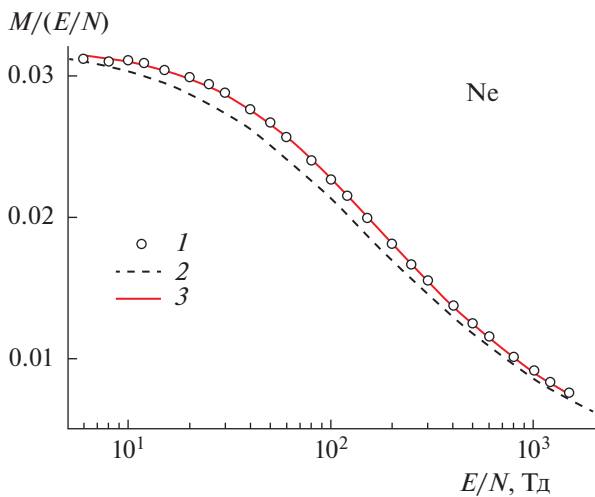
### ВВЕДЕНИЕ

Важной характеристикой слабоионизованной плазмы является подвижность положительных ионов в собственном газе в электрическом поле. Подвижность ионов занимает центральное место в различных явлениях физики газового разряда и химии плазмы [1, 2], в том числе в амбиполярной диффузии [3, 4], в формировании пограничного слоя в газовых разрядах [5–7], в зарядке макрочастиц и силе ионного увлечения в пылевой плазме [8–14], в спектроскопии ионной подвижности [15–18], а также во многих других процессах. Часто делается упрощающее предположение, что ионная подвижность постоянна и не зависит от напряженности электрического поля. Это не согласуется с экспериментальными измерениями, которые показали, что для самого интересного случая атомарных ионов инертных газов в их собственных газах подвижность уменьшается с увеличением напряженности электрического поля [19–22]. Не существует общего выражения для зависимости подвижности ионов от электрического поля. В то же время несколько теоретических приближений были представлены в различное время [3, 23–27]. Среди них одно из самых простых и удобных для практического использования – это полуэмпирическая формула, предложенная Фростом [3]:

$$M = A \left[ 1 + B \frac{E}{N} \right]^{-1/2} \frac{E}{N}. \quad (1)$$

Здесь  $M$  обозначает скорость дрейфа иона, выраженную в единицах его тепловой скорости,  $M = u/v_T$ , где  $v_T = \sqrt{T/m}$ ,  $T$  – температура ионов в энергетических единицах,  $m$  – масса иона ( $M$  часто называют тепловым числом Маха). Отношение напряженности электрического поля к плотности нейтрального газа  $E/N$  выражается в единицах Таунсенда ( $1 \text{ Тд} = 10^{-17} \text{ В см}^2$ ).

Большая часть экспериментальных исследований и вычислений подвижности ионов в собственных газах выполнены для комнатной температуры. Несмотря на то что свойства криогенных разрядов существенно зависят от температуры газа [28], опубликовано лишь несколько экспериментальных работ по подвижности ионов при криогенных температурах [21, 29]. Низкие температуры типичны для ионосферной плазмы, а также для межпланетного и межзвездного пространства. В экспериментах с ультрахолодной плазмой в магнитных ловушках Паули ионы также дрейфуют в очень холодных газах, имеющих температуру значительно ниже 1 К [30]. С другой стороны, современные плазменные технологии зачастую используют разряды, в которых температура газа существенно превышает комнатную. Все это указывает на важность изучения влияния не только сильных электрических полей, но и температуры на дрейфовые характеристики ионов в плазме.



**Рис. 1.** Нормированная на тепловую скорость подвижность ионов  $\text{Ne}^+$  в газообразном  $\text{Ne}$  в зависимости от  $E/N$ : 1 – экспериментальные данные [21], 2 – результаты расчета по формуле Фроста (1), 3 – ее модификации (2).

**МОДИФИЦИРОВАННАЯ ФОРМУЛА ФРОСТА ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ**

За формулой Фроста (1) стоит следующая простая физика [4, 26]. Элементарные теории ионного дрейфа в электрическом поле дают для скорости дрейфа

$$u = \frac{eE\tau}{m},$$

где  $e$  – заряд иона,  $\tau$  – среднее время между его столкновениями с нейтральными атомами

$$\tau = \left\langle \frac{1}{Nv\sigma(v)} \right\rangle.$$

Здесь  $\sigma(v)$  – зависящее от скорости сечение передачи импульса, а угловые скобки обозначают соответствующее усреднение по относительным скоростям  $v$  между ионами и нейтрами. В режиме слабых электрических полей и дотеплового дрейфа усреднение производится по тепловым скоростям и, следовательно, время столкновения  $\tau \sim 1/Nv_T\sigma(v_T)$  не зависит от скорости дрейфа и электрического поля. В результате скорость дрейфа прямо пропорциональна  $E/N$  независимо от конкретной формы ион-нейтрального взаимодействия. В противоположном пределе сильных полей и сверхтеплового дрейфа тепловой вклад незначителен  $\tau \sim 1/Nu\sigma(u)$ . Здесь зависимость скорости дрейфа от  $E/N$  определяется природой ион-нейтральных взаимодействий. Например, для (возможно, не очень реалистичного в контексте ион-нейтральных взаимодействий) обратно-степенного потенциала взаимодействия  $\sim r^{-n}$  получаем  $\sigma(u) \sim u^{-4/n}$ , если  $n \gg 1$ . Это приводит к

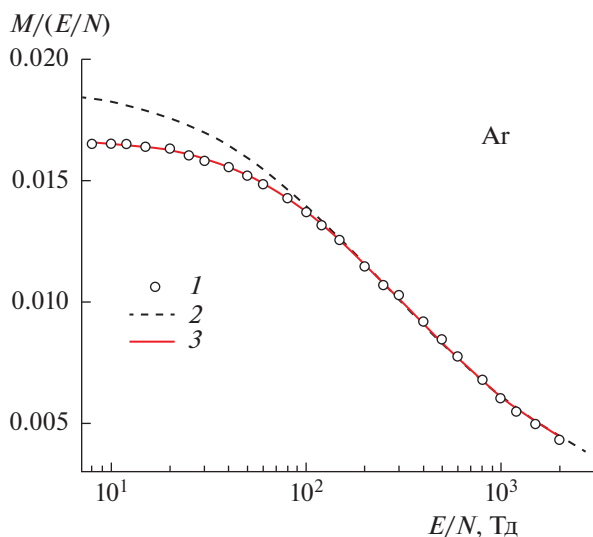
зависимости  $u \sim (E/N)^{n/(2n-4)}$ . В пределе взаимодействия твердых сфер ( $n \rightarrow \infty$ ) получаем  $u \sim (E/N)^{1/2}$ . Этот предельный случай обычно актуален потому, что при высоких энергиях сечения столкновения ион-нейтрал приближаются к постоянным асимптотам. Для ионов, дрейфующих в их собственных газах, при достаточно высоких температурах (доминирующий механизм столкновений – резонансный обмен зарядами) сечение имеет только слабую логарифмическую зависимость от относительной скорости [4, 31].

Таким образом, полуэмпирическая формула Фроста (1) представляет собой только один простой способ интерполяции между предельными режимами слабых и сильных электрических полей. Как правило, она довольно хорошо согласуется с экспериментальными результатами по скоростям дрейфа атомарных ионов инертных газов в их собственных газах при комнатной температуре. Однако существует возможность дальнейшего улучшения согласия. Например, оригинальная формула Фроста завышает подвижность ионов  $\text{Ag}^+$  в  $\text{Ag}$  в режиме слабого электрического поля [32, 33].

Ниже будет продемонстрировано, что незначительная модификация формулы Фроста, предложенная в [34], позволяет достичь отличного согласия с экспериментальными данными для различных газов во всем диапазоне  $E/N$ , где данные имеются. Предложенная аппроксимация имеет вид

$$M = A \left[ 1 + \left( B \frac{E}{N} \right)^C \right]^{-1/2C} \frac{E}{N}, \tag{2}$$

где  $C$  – параметр порядка единицы. Эта формула верна при комнатной температуре в соответствующих пределах слабых и сильных электрических полей. При  $C = 1$  выражение (2) сводится к общепринятой формуле (1). На рис. 1–3 демонстрируется сравнение доступных экспериментальных данных по скоростям дрейфа  $\text{Ne}^+$ ,  $\text{Ag}^+$  и  $\text{Xe}^+$  в их собственных газах с исходной формулой Фроста (1) и с модифицированной формулой (2). Предложенная модификация обеспечивает отличное согласие с экспериментальными результатами. Случай  $\text{Ne}$  и  $\text{Ag}$  особенно актуален в свете экспериментов с ПК-4 лабораторией на Международной космической станции [35, 36]. Полученные значения параметров  $A$ ,  $B$  и  $C$  приведены в табл. 1. (значения  $A$  и  $B$ , естественно, несколько отличаются от первоначально предложенных Фростом в формуле (1)). Модифицированная формула Фроста хотя и не приводит к простому аналитическому соотношению между эффективной частотой передачи импульса и нормированной скоростью дрейфа ионов [37], однако для практических численных расчетов она столь же удобна, как и оригинальная формула, а ее точность выше.

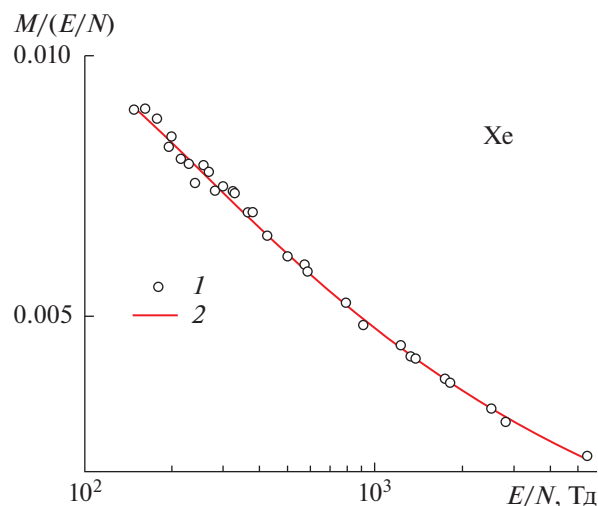


**Рис. 2.** Нормированная на тепловую скорость подвижность ионов  $\text{Ag}^+$  в газообразном  $\text{Ag}$  в зависимости от  $E/N$ : 1 – экспериментальные данные [21], 2 – результаты расчета по (1), 3 – по ее модификации (2).

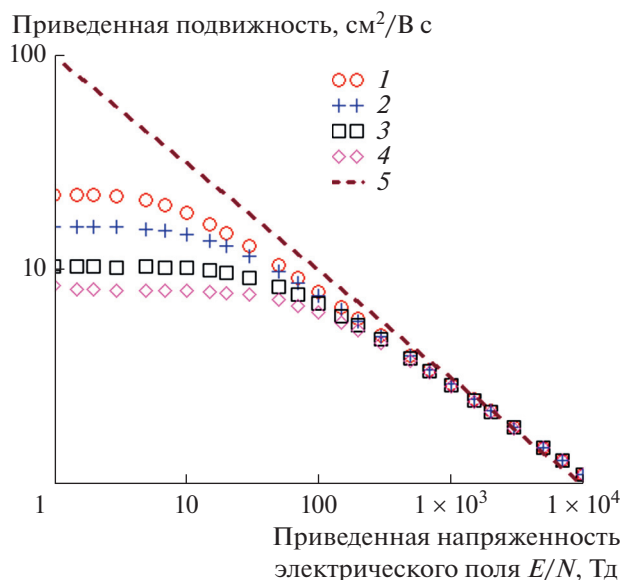
#### ФОРМУЛА ФРОСТА ПРИ ПРОИЗВОЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Температурная зависимость дрейфовых характеристик атомарных ионов в собственных газах исследована в работах [38–40] методами численного моделирования и анализа экспериментальных данных. Формулы (1) и (2) справедливы при достаточно высоких температурах, когда в рассеянии ионов на атомах основную роль играет процесс резонансной перезарядки. В случае, когда температура газа становится такой низкой, что преобладает поляризационное взаимодействие и столкновения с резонансной перезарядкой не играют существенной роли, характеристики дрейфа радикально меняются. На рис. 4 и 5 приведены результаты расчетов методом Монте-Карло характеристик дрейфа ионов гелия в собственном газе в зависимости от приведенной напряженности электрического поля для различных температур атомов:  $T = 0.1, 1, 4.2, 77, 300$  и  $600$  К. Зависимости приведенного коэффициента подвижности ионов  $K = u/E$  от  $E/N$  (рис. 4) [40] демонстрируют, что влияние температуры атомов на подвижность в случае криогенных температур атомов газа может быть весьма велико. Особенно сильно это влияние проявляется в области не слишком сильных полей  $E/N < 100$  Тд.

В работах [38, 39] выполнены расчеты подвижности ионов благородных газов и найдена аппроксимация зависимостей коэффициентов  $A$  и  $B$  от температуры атомов:



**Рис. 3.** Нормированная на тепловую скорость подвижность ионов  $\text{Xe}^+$  в газообразном  $\text{Xe}$  в зависимости от  $E/N$ : 1 – экспериментальные данные [29], 2 – результаты расчета по (2).



**Рис. 4.** Зависимости приведенной подвижности ионов гелия в гелии от приведенной напряженности электрического поля при: 1 –  $T = 4.2$  К, 2 – 77, 3 – 300, 4 – 600, 5 – в пределе сильного поля [32–34].

**Таблица 1.** Значения параметров в модифицированной формуле Фроста ( $T = 300$  К)

Ион	$A, \text{Тд}^{-1}$	$B, \text{Тд}^{-1}$	$C$
$\text{He}^+$	0.0354	0.0118	1.355
$\text{Ne}^+$	0.0321	0.0120	1.181
$\text{Ar}^+$	0.0168	0.0070	1.238
$\text{Kr}^+$	0.0136	0.0054	1.422
$\text{Xe}^+$	0.0119	0.0041	0.947

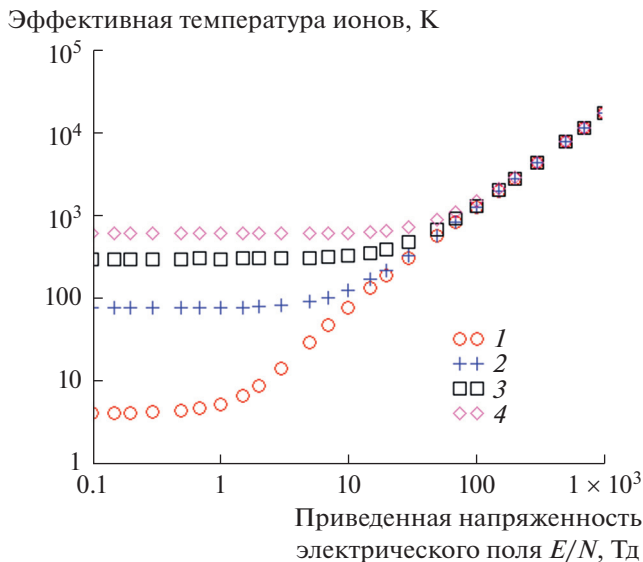


Рис. 5. Зависимости эффективной температуры ионов  $\text{Ne}^+$  при дрейфе в  $\text{Ne}$  от приведенной напряженности электрического поля при: 1–4 – см. рис. 4.

$$A_T = \left[ \frac{300(\epsilon_0 + 300)}{T(\epsilon_0 + T)} \right]^{1/2} A, \quad (3)$$

$$B_T = \frac{\epsilon_0 + 450}{\epsilon_0 + 1.5T} B,$$

где  $\epsilon_0$  – подгоночный параметр, значения которого для инертных газов приведены в табл. 2. Функция  $A_T(T)$  правильно описывает зависимость подвижности ионов от температуры. Действительно, при низких температурах подвижность ионов  $K$  в собственном газе определяется процессами упругого рассеяния в поляризационном потенциале,  $K(T) = \text{const}$ , а при высоких температурах преобладает неупругое рассеяние с резонансной перезарядкой,  $K(T) \sim 1/\sqrt{T}$  [25]. Параметр  $\epsilon_0$  определяет верхний предел применимости предположения о постоянстве частоты столкновений. При  $T \ll \epsilon_0$  и  $mu^2/2 \ll \epsilon_0$  основной вклад в рассеяние иона на атомах дает поляризационное взаимодействие, а скорость дрейфа слабо зависит от электрического поля.

В настоящей работе предлагается дальнейшая модификация формулы Фроста:

$$M = A_T \left( 1 + \left( B_T \frac{E}{N} \right)^{C_1} \right)^{-1/2C_2} \frac{E}{N}, \quad (4)$$

где  $A_T$  и  $B_T$  зависят от температуры и параметра  $\epsilon_0$  согласно формуле (3). В табл. 3 представлены коэффициенты аппроксимации подвижности по формуле (4), погрешность экспериментальных данных и относительная погрешность аппроксимации по сравнению с экспериментальными данными. При криогенных температурах модифика-

Таблица 2. Коэффициенты  $A_T$  и  $B_T$  для разных температур, вычисленные по формулам (1) и (2) с использованием поправочного коэффициента  $C$

Система	$T$ , К	$A_T$ , $\text{Td}^{-1}$	$B_T$ , $\text{Td}^{-1}$	$C$	$\epsilon_0$ , К
$\text{Ne}^+$ в $\text{Ne}$	4.35	0.299	0.0420	1	89.2
	77	0.107	0.0196	1	
	85.7	0.0984	0.0184	1	
	300	0.035	0.0074	1	
	300	0.035	0.0118	1.355	–
$\text{Ne}^+$ в $\text{Ne}$	216	0.044	0.0083	1	211.4
	300	0.034	0.0067	1	
	300	0.032	0.0120	1.181	
$\text{Ar}^+$ в $\text{Ar}$	77	0.0066	0.0445	1	229.8
	300	0.0171	0.0034	1	
	300	0.0168	0.0070	1.238	
$\text{Kr}^+$ в $\text{Kr}$	300	0.0150	0.0028	1	305.3
	300	0.0136	0.0054	1.422	
$\text{Xe}^+$ в $\text{Xe}$	293	0.0122	0.0023	1	323.9
	300	0.0120	0.0022	1	
	300	0.0119	0.0041	0.947	

**Таблица 3.** Коэффициенты аппроксимации подвижности по формуле (4), погрешность экспериментальных данных и относительная погрешность аппроксимации по сравнению с экспериментальными данными

Система	$T, K$	$E/N, Tд$	$\epsilon_0, K$	$C_1$	$C_2$	Погрешность эксперимента, %	Погрешность аппроксимации эксперимента, %
Ne <sup>+</sup> в Ne	4.35–300	5–700	89.2	1.231	0.965	1–5	6.0
Ne <sup>+</sup> в Ne	216, 300	6–1500	211	0.802	0.636	1–3	2.27
Ar <sup>+</sup> в Ar	77.3, 300	2–2000	230	0.933	0.677	2–3	2.42
Kr <sup>+</sup> в Kr	300	40–3000	305	0.833	0.634	5	1.88
Xe <sup>+</sup> в Xe	293, 300	40–800	324	0.839	0.635	0.8	0.57

ция формулы Фроста (4) обладает наилучшей точностью.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена модификация оригинальной формулы Фроста для подвижностей положительных ионов в их собственных газах. Новые выражения почти так же просты, как и оригинальное, но находятся в лучшем согласии с экспериментальными результатами для различных систем во всем диапазоне приведенных напряженностей электрического поля и температур. Показано, что температура газа является важным параметром, определяющим характеристики дрейфа ионов. Расчеты показали, что переход к разряду при сверхнизких температурах газа приводит к сильнейшей анизотропии функции распределения ионов по скоростям. Полученные результаты могут быть использованы при планировании экспериментов с газоразрядной плазмой, анализе экспериментальных данных с пылевой плазмой в криогенном разряде и при комнатной температуре, а также импульсных разрядов с высокой напряженностью электрических и магнитных полей. Они также представляют интерес для специалистов, занимающихся разработкой приборов и развитием экспериментальных методов физики в спектроскопии ионной подвижности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радциг А.А., Смирнов Б.М. Коэффициенты переноса ионов в газе в электрическом поле // Химия плазмы. Сб. науч. ст. Вып. 11. М.: Энергоатомиздат, 1984. С. 170.
2. Салым Я.И. Ионы в приземном слое атмосферы // Химия плазмы. Сб. науч. ст. Вып. 17. М.: Энергоатомиздат, 1993. С. 194.
3. Frost L.S. Effect of Variable Ionic Mobility on Ambipolar Diffusion // Phys. Rev. 1957. V. 105. P. 354.
4. Raizer Y.P. Gas Discharge Physics. Berlin: Springer, 2011. 449 p.
5. Riemann K.U. The Bohm Criterion and Sheath Formation // J. Phys. D: Appl. Phys. 1991. V. 24. P. 493.
6. Riemann K.U. Consistent Analysis of a Weakly Ionized Plasma and its Boundary Layer // J. Phys. D: Appl. Phys. 1992. V. 25. P. 1432.
7. Phelps A.V. The Application of Scattering Cross Sections to Ion Flux Models in Discharge Sheaths // J. Appl. Phys. 1994. V. 76. P. 747.
8. Barnes M.S., Keller J.H., Forster J.C., O'Neill J.A., Coultas D.K. Transport of Dust Particles in Glow-Discharge Plasmas // Phys. Rev. Lett. 1992. V. 68. P. 313.
9. Khrapak S.A., Ivlev A.V., Morfill G.E., Thomas H.M. Ion Drag Force in Complex Plasmas // Phys. Rev. E. 2002. V. 66. P. 046414.
10. Khrapak S.A., Ivlev A.V., Zhdanov S.K., Morfill G.E. Hybrid Approach to the Ion Drag Force // Phys. Plasmas. 2005. V. 12. P. 042308.
11. Fortov V.E., Ivlev A., Khrapak S., Khrapak A., Morfill G. Complex (Dusty) Plasmas: Current Status, Open Issues, Perspectives // Phys. Rep. 2005. V. 421. P. 1.
12. Zobnin A.V., Usachev A.D., Petrov O.F., Fortov V.E. Ion Current on a Small Spherical Attractive Probe in a Weakly Ionized Plasma with Ion-Neutral Collisions (Kinetic Approach) // Phys. Plasmas. 2008. V. 15. P. 043705.
13. Khrapak S.A., Thoma M.H., Chaudhuri M., Morfill G.E., Zobnin A.V., Usachev A.D., Petrov O.F., Fortov V.E. Particle Flows in a DC Discharge in Laboratory and Microgravity Conditions // Phys. Rev. E. 2013. V. 87. P. 063109.
14. Puttscher M., Melzer A. Dust Particles under the Influence of Crossed Electric and Magnetic Fields in the Sheath of an RF Discharge // Phys. Plasmas. 2014. V. 21. P. 123704.
15. Буряков И.А., Крылов Е.В., Макасы А.Л., Назаров Э.Г., Первухин В.В., Расулев У.Х. Разделение ионов по подвижности в переменном электрическом поле высокой напряженности // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. Вып. 12. С. 60.
16. Буряков И.А. Экспериментальное определение зависимости коэффициентов подвижности ионов в газе от напряженности электрического поля // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 11. С. 109.
17. Буряков И.А. Определение кинетических коэффициентов переноса ионов в воздухе как функций напряженности электрического поля и температуры // ЖТФ. 2004. Т. 74. № 8. С. 15.
18. Буряков И.А. История спектроскопии приращения ионной подвижности // Журн. аналитической химии. 2018. Т. 73. Вып. 12. С. 941.

19. *Hornbeck J.A.* The Drift Velocities of Molecular and Atomic Ions in Helium, Neon, and Argon // *Phys. Rev.* 1951. V. 84. P. 615.
20. *Biondi M.A., Chanin L. M.* Mobilities of Atomic and Molecular Ions in the Noble Gases // *Phys. Rev.* 1954. V. 94. P. 910.
21. *Ellis H., Pai R., McDaniel E., Mason E., Viehland L.* Transport Properties of Gaseous Ions over a Wide Energy Range // *At. Data Nucl. Data Tables.* 1976. V. 17. P. 177.
22. *Basurto E., de Urquijo J., Alvarez I., Cisneros C.* Mobility of  $\text{He}^+$ ,  $\text{Ne}^+$ ,  $\text{Ar}^+$ ,  $\text{N}_2^+$ ,  $\text{O}_2^+$ , and  $\text{CO}_2^+$  in their Parent Gas // *Phys. Rev. E.* 2000. V. 61. P. 3053.
23. *Wannier G.H.* Motion of Gaseous Ions in Strong Electric Fields // *Bell System Tech. J.* 1953. V. 32. P. 170.
24. *Fahr H., Müller K.G.* Ionenbewegung unter dem Einfluß von Umladungsstößen // *Zeitschrift für Physik.* 1967. Bd. 200. S. 343.
25. *Patterson P.L.* Temperature Dependence of Helium-Ion Mobilities // *Phys. Rev. A.* 1970. V. 2. P. 1154.
26. *Hahn H.-S., Mason E.A.* Gaseous Ion Mobility in Electric Fields of Arbitrary Strength // *Phys. Rev. A.* 1972. V. 6. P. 1573.
27. *Lampe M., Röcker T.B., Joyce G., Zhdanov S.K., Ivlev A.V., Morfill G.E.* Ion Distribution Function in a Plasma with Uniform Electric Field // *Phys. Plasmas.* 2012. V. 19. P. 113703.
28. *Антипов С.Н., Асиновский Э.И., Кириллин А.В., Майоров С.А., Марковец В.В., Петров О.Ф., Фортвов В.Е.* Заряд и структура пылевых частиц в газовом разряде при криогенных температурах // *ЖЭТФ.* 2008. Т. 133. Вып. 4. С. 948.
29. *Viehland L.A., Mason E.A.* Transport Properties of Gaseous Ions over a Wide Energy Range, IV // *At. Data Nucl. Data Tables.* 1995. V. 60. P. 37.
30. *Killian T.C.* Ultracold Neutral Plasmas // *Science.* 2007. V. 316. P. 705.
31. *Smirnov B.M.* Theory of Gas Discharge Plasma. N.Y.: Springer Int. Publ., 2015.
32. *Robertson S., Sternovsky Z.* Monte Carlo Model of Ion Mobility and Diffusion for Low and High Electric Fields // *Phys. Rev. E.* 2003. V. 67. P. 046405.
33. *Khrapak S., Huber P., Thomas H., Naumkin V., Molotkov V., Lipaev A.* Theory of a Cavity around a Large Floating Sphere in Complex (Dusty) Plasma // *Phys. Rev. E.* 2019. V. 99. P. 053210.
34. *Khrapak S.A., Khrapak A.G.* Modified Frost Formula for the Mobilities of Positive Ions in their Parent Gases // *AIP Adv.* 2019. V. 9. P. 095008.
35. *Pustynnik M.Y., Fink M.A., Nosenko V. et al.* Particle Charge in PK-4 DC Discharge from Ground-Based and Microgravity Experiments // *Rev. Sci. Instrum.* 2016. V. 87. P. 093505.
36. *Antonova T., Khrapak S.A., Pustynnik M.Y. et al.* Particle Charge in PK-4 DC Discharge from Ground-Based and Microgravity Experiments // *Phys. Plasmas.* 2019. V. 26. P. 113703.
37. *Khrapak S.A.* Practical Expression for an Effective Ion-Neutral Collision Frequency in Flowing Plasmas of Some Noble Gases // *J. Plasma Phys.* 2013. V. 79. P. 1123.
38. *Голятина Р.И., Майоров С.А.* Аппроксимация скорости дрейфа ионов в собственном газе // *Краткие сообщения по физике.* 2015. Т. 42. № 10. С. 21.
39. *Голятина Р.И., Майоров С.А.* Аппроксимация характеристик дрейфа ионов в собственном газе // *Физика плазмы.* 2017. Т. 43. № 1. С. 71.
40. *Майоров С.А., Голятина Р.И., Коданова С.К., Рамазанов Т.С.* Исследование влияния температуры атомов на дрейф ионов в газе // *Инж. физика.* 2019. № 10. С. 22.