ФИЗИКА ПЛАЗМЫ, *2024*, *том 50*, *№ 5*, *с. 588–596*

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПЛАЗМА

УДК 537.5

КИНЕТИЧЕСКИЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ЭЛЕКТРОНОВ В СЛАБОИОНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЕ СМЕСЕЙ ВОЗДУХА С ПАРАМИ ВОДЫ В СИЛЬНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

© 2024 г. И. В. Кочетов[a, b], Н. Л. Александров[c, d]

[a]*Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия*
[b]*Государственный научный центр РФ «Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Москва, Россия*
[c]*Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия*
[d]*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия*
e-mail: nick_aleksandrov@mail.ru

Поступила в редакцию 05.03.2024 г.
После доработки 20.03.2024 г.
Принята к публикации 23.03.2024 г.

С помощью численного решения уравнения Больцмана выполнен расчет скорости дрейфа электронов, коэффициентов их продольной и поперечной диффузии, а также коэффициентов ионизации и диссоциативного прилипания в слабоионизованной плазме смесей воздуха с парами воды в широком диапазоне приведенных электрических полей (1–650 Тд, 1 Тд = 10^{-17} В см^2) и мольных долей паров воды (0–1). Проведено сравнение результатов расчета с новыми экспериментальными данными и получено хорошее согласие между ними. Показано, что для всех коэффициентов и средней энергии электронов их зависимость от состава газа меняется с ростом электрического поля. При малых приведенных полях увеличение содержания молекул воды H_2O в смесях приводит к уменьшению коэффициентов переноса и средней энергии электронов, в то время как при больших полях наблюдается обратная тенденция. Показано, что для скорости дрейфа и коэффициента прилипания электронов существуют электрические поля, при которых значения этих коэффициентов в газовых смесях могут быть больше коэффициентов в сухом воздухе или в парах воды. Дано качественное объяснение полученным зависимостям электронных коэффициентов от электрического поля и содержания H_2O в смеси.

Ключевые слова: коэффициенты переноса электронов, коэффициенты ионизации и прилипания электронов, слабоионизованная неравновесная плазма, сильное электрическое поле, рассеяние электронов на молекулах, смеси воздуха с парами воды

DOI: 10.31857/S0367292124050085, **EDN:** PWEKHN

1. ВВЕДЕНИЕ

Слабоионизованная неравновесная газоразрядная плазма, создаваемая во влажном воздухе, около поверхности воды, в пузырьках или пене, встречается как в природных явлениях, так и в современных технологиях. Например, плазма в смесях воздуха с парами воды важна для применения в медицине [1, 2], для стимулированного плазмой воспламенения и горения в топливосодержащих газовых смесях [3–5], для плазменной аэродинамики [6], для очистки газов и жидкостей [1, 7], а также в области использования плазменных методов в сельском хозяйстве [8] и решения задач газовой изоляции [9]. Поэтому в настоящее время уделяется большое внимание моделированию свойств неравновесной газоразрядной плазмы в воздухе с парами воды, для чего необходимы данные по коэффициентам переноса электронов и константам скорости электронных процессов в таких газовых средах.

Имеется достаточно много измерений [10–13] и расчетов [14] электронных характеристик в широком диапазоне приведенных электрических полей E/N (N – концентрация нейтральных частиц); при этом измерения в основном относятся к чистым газам. Расчеты выполняются, как правило, на основе численного решения уравнения Больцмана или методом Монте-Карло. В расчетах используются базы данных по сечениям упругого и неупругого рассеяния электронов на нейтральных частицах [12, 13]. Для газовых смесей таких экспериментальных данных гораздо меньше, хотя они могут быть использованы для дополнительной проверки надеж-

ности данных по сечениям рассеяния электронов на атомах и молекулах. В отношении электронных характеристик в смесях воздуха с парами воды имеются измерения скорости дрейфа электронов [15] для $E/N = 0.1 - 500$ Тд в смесях с мольной долей H_2O от 0 до 20%. Там же приведены результаты расчетов этой величины на основе численного решения уравнения Больцмана и получено хорошее согласие с измерениями практически во всем диапазоне исследованных параметров. Наконец, совсем недавно появились измерения коэффициента продольной диффузии электронов, коэффициентов прилипания электронов и эффективного коэффициента ионизации для воздуха с парами воды в диапазоне $E/N = 1.8 - 650$ Тд и мольных долей H_2O от 0 и до 100% [16]. Там же добавлены измерения скорости дрейфа электронов для смесей воздуха с 50% H_2O. Эти данные необходимы для моделирования как стационарных характеристик газоразрядной плазмы [14], так и ее устойчивости [17, 18].

Основной целью данной работы является расчет электронных коэффициентов переноса в условиях эксперимента [16] и сравнение расчета с измерениями. Такие данные представляют интерес как в прикладном отношении, так и в фундаментальном. Последнее связано с тем, что молекула воды H_2O, в отличие от молекул азота N_2 и кислорода O_2, обладает большим постоянным дипольным моментом, что приводит к сильным количественным и качественным различиям в сечениях рассеяния электронов на молекулах H_2O и молекулах в сухом воздухе. В результате, как показывают измерения [15, 16], коэффициенты переноса электронов в смесях воздуха с парами воды сложным образом зависят от приведенного электрического поля и состава газа. В частности, они могут оказаться больше соответствующих коэффициентов в чистых парах воды и в сухом воздухе. В данной работе этот синергетический эффект объясняется на основе данных по сечениям упругого и неупругого рассеяния электронов на молекулах H_2O, N_2 и O_2.

2. МЕТОД РАСЧЕТА И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СЕЧЕНИЯ РАССЕЯНИЯ

Коэффициенты переноса электронов в слабоионизованных смесях воздуха с парами воды находились на основе неравновесного распределения электронов, которое определялось в зависимости от приведенного электрического поля E/N из численного решения уравнения Больцмана в рамках двучленного приближения [10, 14]. При этом учитывались упругие и неупругие столкновения

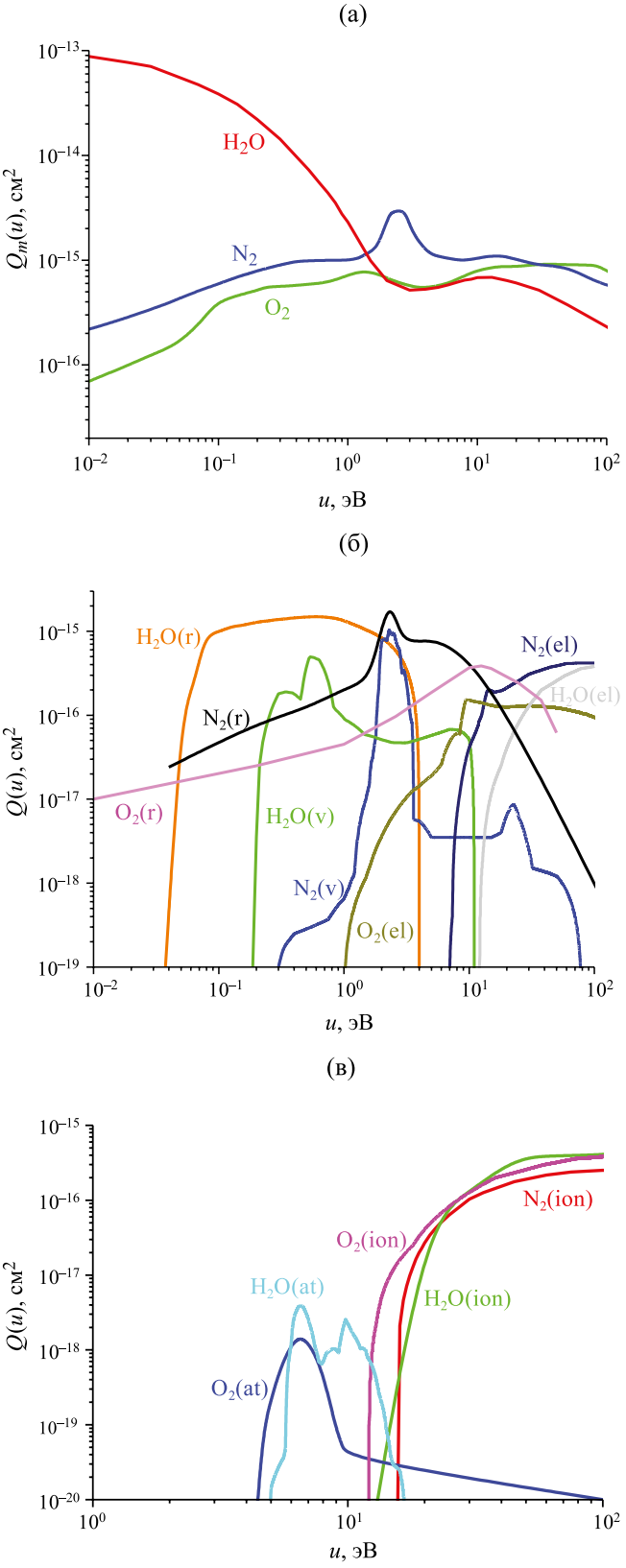

Рис. 1. Транспортные сечения (а), сечения возбуждения вращательных (r), колебательных (v) и электронных (el) состояний (б) и сечения ионизации и прилипания (в) при рассеянии электронов на молекулах H_2O, O_2 и N_2 в зависимости от энергии электронов u.

электронов с молекулами, а электрон-электронным и электрон-ионным взаимодействиями пренебрегалось из-за малой степени ионизации в условиях экспериментов [15, 16]. Среди неупругих процессов рассматривалось возбуждение вращательных, колебательных и электронных уровней молекул электронным ударом, а также их ионизация и диссоциативное прилипание электронов к молекулам. Удары второго рода учитывались только применительно к столкновениям электронов с вращательно-возбужденными молекулами, поскольку доля колебательно-возбужденных молекул в рассматриваемых условиях пренебрежимо мала. Нестационарность функции распределения электронов по энергиям и плотности электронов из-за рождения и гибели электронов в процессах ионизации и прилипания к молекулам учитывалась при решении уравнения Больцмана в рамках приближения, используемого для импульсных таунсендовских экспериментов [19]. Именно к этому типу относятся эксперименты [15, 16], результаты которых рассматривались в данной работе.

Используемый в работе метод численного решения уравнения Больцмана описан в [20]. В расчетах в качестве входных данных брались самосогласованные наборы сечений рассеяния электронов на молекулах O_2, N_2 и H_2O, которые приведены в [21]. Самосогласованность этих сечений означает то, что эти данные позволяют получить хорошее согласие расчетных данных по электронным коэффициентам переноса и коэффициентам ионизации и диссоциативного прилипания с измерениями в чистых газах. На рис. 1 приведены используемые транспортные сечения рассеяния и сечения неупругих процессов при рассеянии электронов на молекулах O_2, N_2 и H_2O. На рис. 1б не приведены сечения колебательного возбуждения молекул O_2, которые сравнительно малы и их трудно изображать на рисунке, поскольку они из-за резонансного характера имеют вид очень узких пиков. Из рисунка 1 видно принципиальное отличие сечений рассеяния электронов для молекул H_2O с большим постоянным дипольным моментом от сечений для неполярных молекул O_2 и N_2. При малых энергиях электронов (< 1.5 эВ) транспортное сечение Q_m и сечения неупругого рассеяния электронов на молекулах H_2O, в отличие от случая молекул O_2 и N_2, аномально велики. При этом сечение Q_m для H_2O быстро падает с увеличением энергии. При энергиях электронов больше 1.5 эВ транспортное сечение и сечения возбуждения H_2O оказываются значительно меньше аналогичных величин для N_2.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕНОСА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчет скорости дрейфа электронов и их коэффициента продольной (вдоль внешнего электрического поля) диффузии, а также их сравнение с экспериментальными данными [15, 16], приведены соответственно на рис. 2 и 3 в зависимости от приведенного электрического поля E/N.

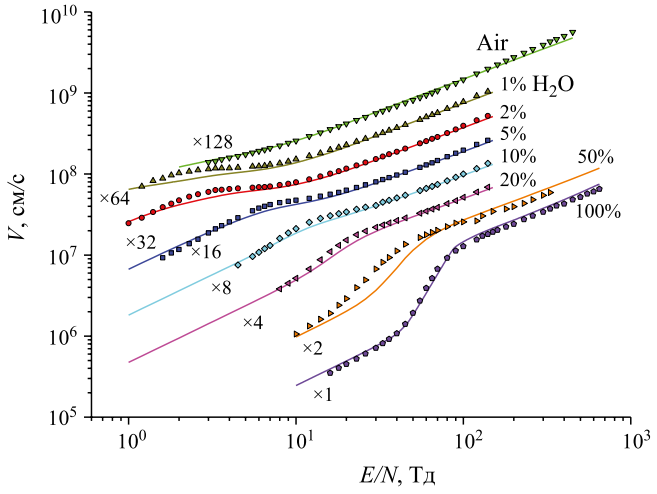

Рис. 2. Скорость дрейфа электронов в смесях H_2O:воздух в зависимости от приведенного электрического поля. Точки – эксперимент [15, 16], кривые – данный расчет. Для ясности представления данные, соответствующие разным мольным долям H_2O, умножены на соответствующие коэффициенты.

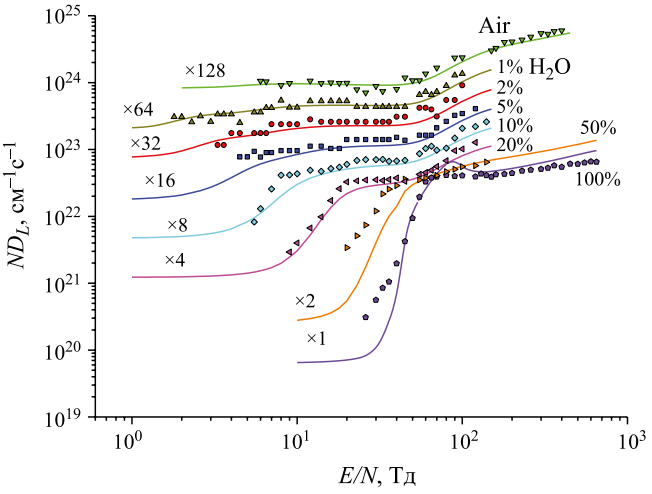

Рис. 3. Коэффициент продольной диффузии электронов ND_L в смесях H_2O:воздух в зависимости от приведенного электрического поля. Точки – эксперимент [16], кривые – данный расчет. Для ясности представления данные, соответствующие разным мольным долям H_2O, умножены на различные коэффициенты.

Для большей ясности сравнения данные, соответствующие разным долям H_2O в смесях H_2O:воздух, умножаются на рисунках на разные множители. В экспериментах [15, 16], как и во всех подобных измерениях, наиболее точно определялась скорость дрейфа. Погрешность ее измерения не превышала 1.5%. В целом расчеты хорошо передают как общие тенденции в зависимости скорости дрейфа электронов от E/N и мольной доли H_2O в смесях (δ), так и абсолютные значения скорости. Заметное отличие расчетной скорости дрейфа от экспериментальной наблюдается только для δ = 0.5 в диапазоне приведенных электрических полей 20–50 Тд, а также для δ = 0.1 и 0.2 в диапазоне 1.5–4 Тд. В этих областях параметров, согласно настоящим расчетам, средняя энергия электронов лежит в диапазоне 0.13–1 эВ (см. рисунок 4), где наибольшие сечения неупругих процессов реализуются для вращательного возбуждения молекул H_2O. Сечения этих процессов известны достаточно плохо. В настоящей работе для них использовались результаты расчета в борновском приближении, которое может давать заметную погрешность при таких энергиях электронов. Видимо, с этим и связаны наблюдаемые различия между расчетными и экспериментальными данными по скорости дрейфа электронов.

Точность измерения коэффициента продольной диффузии электронов в эксперименте [16] заметно меньше, чем точность измерения скорости дрейфа, и составляет 10–20%. Это, в частности, проявляется в заметном разбросе экспериментальных точек на рис. 3. Тем не менее согласие между расчетом и экспериментом здесь достаточно хорошее. Исключением являются только данные для малых E/N (20–50 Тд) и больших концентраций H_2O (δ = 0.5 и 1). Это тот же диапазон параметров, для которого получалось и заметное различие между экспериментом и расчетом в случае скорости дрейфа. Поэтому такое различие для коэффициента продольной диффузии также есть основания связать с несовершенством данных по сечениям вращательного возбуждения молекул H_2O электронным ударом.

Приведенные на рис. 4 расчетные данные по средней энергии электронов в смесях H_2O: воздух свидетельствуют о том, что практически при всех полях средняя энергия монотонным образом зависит от состава смеси. При малых значениях E/N (< 50 Тд) разбавление воздуха парами воды в заданном электрическом поле приводит к сильному охлаждению электронов из-за больших сечений неупругого рассеяния низкоэнергичных электронов на молекулах H_2O (см. рис. 1б). С ростом энергии электронов, согласно рис. 1б, становятся важнее сечения неупругого рассеяния электронов на молекулах O_2 и N_2. Поэтому при E/N > 50 Тд тенденция меняется и повышение доли молекул H_2O в смесях приводит к незначительному увеличению средней энергии электронов при постоянном значении E/N.

На рис. 5 и 6 приведено сравнение расчетных и экспериментальных данных соответственно для коэффициентов ионизации молекул электронным ударом k_{ion} и диссоциативного прилипания электронов к молекулам k_{att} в зависимости от приведенного электрического поля. В эксперименте [16] измерялась только разность k_{ion} - k_{att}, которая была отрицательной при полях меньше поля пробоя и по-

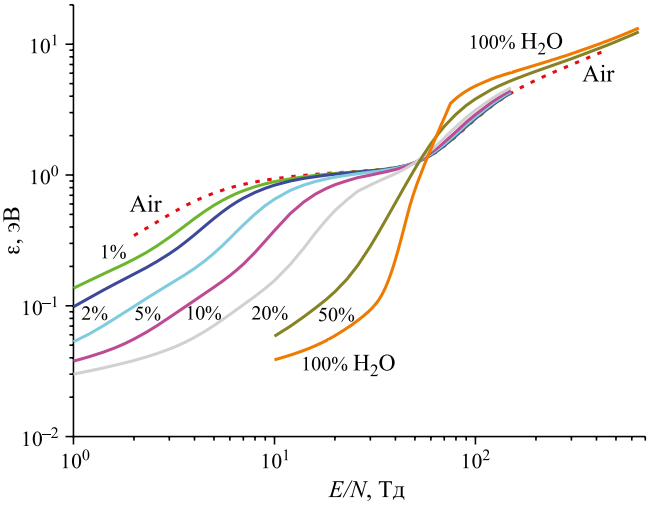

Рис. 4. Средняя энергия электронов в смесях H_2O:воздух в зависимости от приведенного электрического поля.

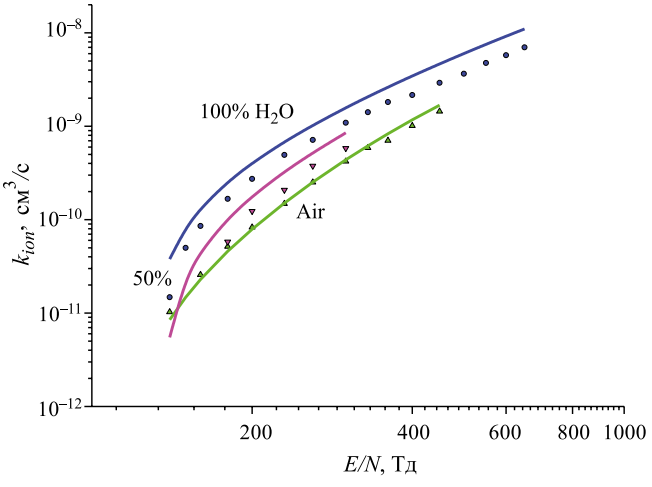

Рис. 5. Константы скорости ионизации молекул электронным ударом в смесях H_2O:воздух в зависимости от приведенного электрического поля. Точки – эксперимент [16], кривые – данный расчет.

ложительной при более высоких полях. Она представлялась в [16] в виде зависимости абсолютной величины k_{ion} - k_{att} от E/N, точность измерений составляла 6–16% и зависила от состава смеси. Детальная информация о точности измерения различных коэффициентов переноса для разных смесей приведена в табл. 1 работы [16]. Зависимость абсолютной величины k_{ion} - k_{att} от E/N была немонотонной – она проходила через максимум, когда скорость ионизации становилась заметной по сравнению со скоростью прилипания, и через минимум, равный 0, когда скорость ионизации становилась больше скорости прилипания. В данной работе для определения измеренных значений k_{att} брались экспериментальные точки левее этого максимума, а для измеренных значений k_{ion} использовались точки правее минимума.

Из рис. 5 и 6 следует, что в целом наблюдается разумное согласие между расчетом и экспериментом. Значительное отличие между ними имеет место только при самых низких значениях E/N, когда скорости прилипания и ионизации малы и снижается точность и измерений и расчетов. Кроме того, есть значительное различие между измеренными и вычисленными значениями k_{ion} для смеси с 50% H_2O, по аналогии с тем, что наблюдалось в случаях со скоростью дрейфа электронов и коэффициента продольной диффузии. Скорее всего, это различие тоже связано с неточностью использованных сечений вращательного возбуждения H_2O. Для коэффициента ионизации, получаемого при более высоких E/N, когда вращательное возбуждение молекул неважно, значительного различия между расчетом и экспериментом для смеси с 50% H_2O нет.

Согласно данным, приведенным на рисунках 5 и 6, скорости ионизации и прилипания растут с увеличением поля E/N и доли H_2O в смесях H_2O:воздух. Первое очевидно, поскольку оба процесса пороговые и коэффициенты ионизации и прилипания увеличиваются при более эффективном нагреве электронов в электрическом поле. Рост коэффициентов с увеличением доли H_2O связан прежде всего с увеличением средней энергии электронов (см. рис. 4), которое имеет место при $E/N > 50$ Тд. Наблюдать изменение этой тенденции при меньших значениях E/N в эксперименте не удается из-за малого количества экспериментальных точек в этой области. Но для расчетных значений k_{att} это начинает проявляться в области малых (< 50 Тд) E/N, когда скорость прилипания уменьшается при добавлении в пары воды воздуха (см. рис. 6).

Чтобы увидеть в явном виде влияние изменения состава смесей на коэффициенты переноса, расчетные кривые, приведенные на рис. 2 и 3, представлены в одном масштабе на рис. 7 и 8, соответственно. Скорость дрейфа обратно пропорциональна частоте передачи импульса электронов при столкновении с молекулами, которую можно оценить согласно $\nu_m \sim NV_{th}Q_m$, где V_{th} – тепловая скорость электронов. При высоких электрических полях ($E/N > 70$ Тд) скорость дрейфа электронов монотонно растет при заданном E/N с увеличением доли H_2O, что связано с меньшим транспортным сечением рассеяния электронов на H_2O по сравнению с аналогичными величинами для

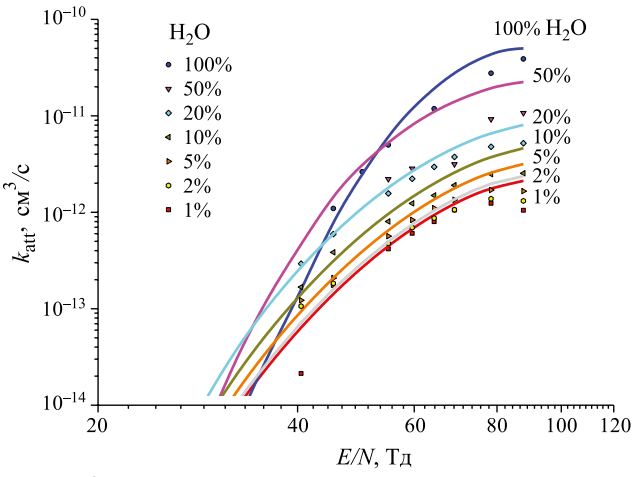

Рис. 6. Константы скорости диссоциативного прилипания электронов к молекулам в смесях H_2O:воздух для различных мольных долей H_2O в зависимости от приведенного электрического поля. Точки – эксперимент [16], сплошные кривые – данный расчет.

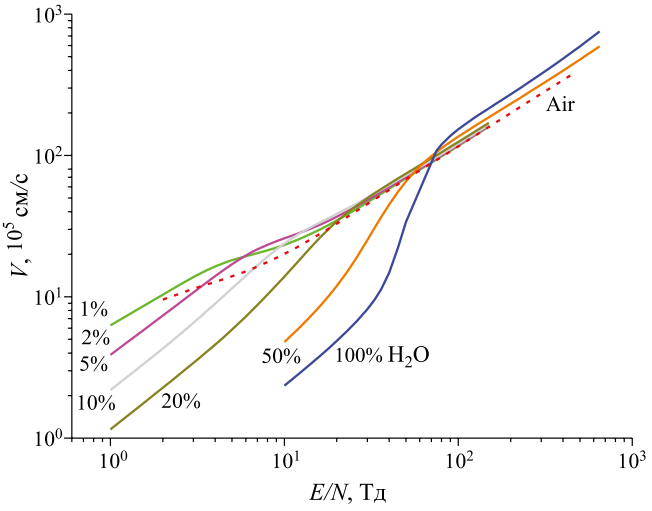

Рис. 7. Скорость дрейфа электронов в смесях H_2O: воздух в зависимости от приведенного электрического поля. Расчеты для разных долей H_2O.

O_2 и N_2 (см. рис. 1 а). При меньших значениях E/N ситуация более сложная. Здесь при больших долях H_2O в смесях скорость дрейфа резко падает из-за аномально большого транспортного сечения для H_2O при малых энергиях электронов (см. рис. 1 а). Кроме того, при фиксированном E/N скорость дрейфа в смеси H_2O:воздух может оказаться больше скорости дрейфа в парах воды и скорости дрейфа в сухом воздухе. Этот вопрос будет более подробно рассмотрен ниже.

Коэффициент продольной диффузии электронов D_L, как и скорость дрейфа, для всех смесей почти везде монотонно растет с увеличением E/N. Эту зависимость можно понять из соотношения для коэффициента диффузии частиц

$$D \sim V_{\text{th}}^2/\nu_m, \qquad (1)$$

которое следует из элементарной кинетической теории. С увеличением E/N растет средняя энергия электронов и, следовательно, V_{th}^2. Поэтому, если частота ν_m не растет быстро при нагреве электронов, то коэффициент D_L увеличивается с ростом поля. При высоких электрических полях разбавление воздуха парами воды приводит к росту средней энергии электронов (см. рис. 4) и к уменьшению усредненного транспортного сечения рассеяния электронов и, следовательно, ν_m (см. рис. 1а). Все это вызывает, согласно (1), увеличение коэффициента диффузии D_L. При малых полях ситуация обратная: здесь с ростом содержания паров воды в смеси средняя энергия электронов уменьшается, а среднее транспортное сечение и ν_m увеличиваются. Поэтому в этом случае увеличение доли молекул H_2O в смеси приводит к резкому уменьшению коэффициента D_L.

На рис. 9 приведены расчетные данные по коэффициенту поперечной диффузии электронов D_T в зависимости от E/N и состава смеси. Этот коэффициент, по аналогии с коэффициентом D_L, монотонно растет с увеличением содержания паров воды в смеси при высоких E/N и монотонно снижается при низких E/N. На рис. 10 приведено отношение коэффициентов продольной и поперечной диффузии электронов D_L/D_T, которое характеризует степень анизотропии диффузии. Это отношение определяется зависимостью средней частоты передачи импульса от электронов к нейтральным частицам ν_m от средней энергии электронов ε, поскольку [22, 23]

$$D_L = D_T - \Delta D, \qquad (2)$$

где ΔD прямо пропорционально безразмерной производной

$$\frac{\varepsilon}{\nu_m}\frac{\partial \nu_m}{\partial \varepsilon}$$

Если частота ν_m не меняется при изменении средней энергии электронов, то анизотропия диффузии электронов отсутствует, и $D_L = D_T$. В случае сухого воздуха, как следует из данных на рис. 1а, сечение Q_m слабо зависит от энергии, а частота ν_m слабо растет с увеличением ε. При этом $\Delta D > 0$ и $D_L < D_T$. В парах воды при энергиях электронов меньше 1.5 эВ наблюдается резкий спад Q_m с ростом энергии. Поэтому при не слишком больших энергиях электронов здесь $\Delta D < 0$ и $D_L > D_T$. Отношение D_L/D_T в парах воды достигает пика при $E/N = 40$ Тд и с дальнейшим ростом поля снижается и становится

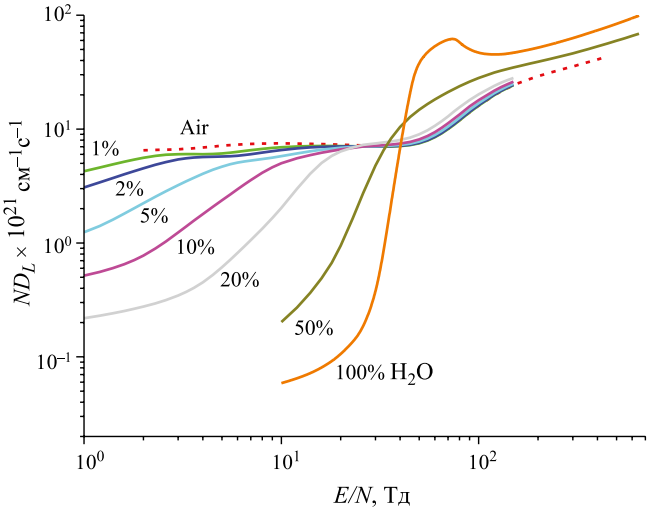

Рис. 8. Коэффициент продольной диффузии электронов ND_L в смесях H_2O:воздух в зависимости от приведенного электрического поля. Расчеты для разных долей H_2O.

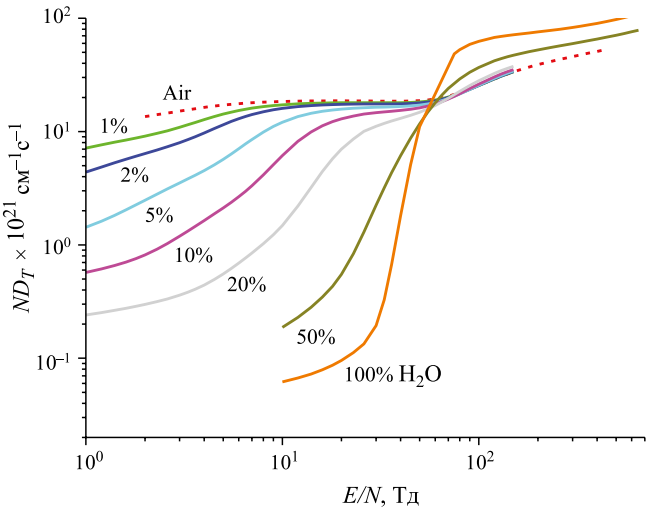

Рис. 9. Коэффициент поперечной диффузии электронов ND_T в смесях H_2O:воздух в зависимости от приведенного электрического поля. Расчеты для разных долей H_2O.

меньше 1 из-за того, что при высоких энергиях сечение Q_m для H_2O слабо зависит от энергии электронов. При добавлении в пары воды воздуха величина пика в зависимости отношения D_L/D_T от E/N снижается, а сам пик сдвигается в область меньших полей. При снижении содержания H_2O в смеси до $\delta = 5\%$ пик практически исчезает, а коэффициент D_L становится меньше D_T. Это происходит из-за того, что с уменьшением δ растет вклад в среднюю частоту ν_m от рассеяния электронов на N_2 и O_2. Поскольку для этих молекул нет резкой отрицательной зависимости Q_m от ε, то это приводит к снижению отношения D_L/D_T. С уменьшением доли H_2O в смеси раньше это снижение начинается при более высоких энергиях; поэтому и пик в зависимости D_L/D_T от E/N смещается с уменьшением δ в сторону более низких полей.

На рис. 11 приведена скорость дрейфа электронов в зависимости от мольной доли H_2O в смесях H_2O:воздух при различных значениях E/N. И в эксперименте, и в расчете при малых (5.5–16 Тд) E/N наблюдается немонотонная зависимость скорости дрейфа от δ: сначала скорость дрейфа медленно растет, а потом резко падает. Эту зависимость можно объяснить следующим образом. В рассматриваемом диапазоне E/N средняя энергия электронов в смесях с малым содержанием H_2O близка к 0.8 эВ и несколько уменьшается с ростом δ (см. рис. 4). В то же время при этих энергиях и $\delta < 0.05$ отношение между транспортными сечениями Q_m для H_2O и N_2 не превышает коэффициента 4 (см. рис. 1а) и вклад рассеяния электронов на H_2O в их суммарную транспортную частоту пренебрежимо мал. При таких энергиях электронов сечения Q_m для N_2 и O_2 почти не меняются с энергией. В итоге небольшое увеличение δ здесь приводит из-за уменьшения средней энергии электронов и тепловой скорости v_{th} к небольшому снижению ν_m и, следовательно, к увеличению скорости дрейфа. При дальнейшем увеличении δ средняя энергия электронов быстро падает. Охлаждение электронов приводит к резкому увеличению частоты ν_m из-за увеличения сечения Q_m для рассеяния медленных электронов на H_2O. Это вызывает снижение скорости дрейфа примерно на порядок величины. При высоких же E/N средняя энергия электронов велика, и здесь сечение Q_m для H_2O гораздо меньше этой величины для N_2, а средняя энергия с ростом δ меняется слабо. Поэтому при больших E/N скорость дрейфа почти не зависит от δ.

Немонотонная зависимость от δ наблюдается и для коэффициента диссоциативного прилипания при низких E/N (см. рис. 6). Например, максимальный расчетный коэффициент при 40 Тд получается для $\delta = 0.5$, в то время как в парах воды и в смесях с меньшим содержанием H_2O он меньше. Такую зависимость можно объяснить следующим образом. Максимальное значение сечения прилипания электронов к H_2O в несколько раз больше аналогичной величины для прилипания к O_2. В то же время увеличение содержания H_2O в смесях приводит при E/N =40 Тд к снижению средней энергии электронов (см. рис. 4). Но, пока δ мало, его увеличение мало сказывается на средней энергии электронов. В результате из-за большего сечения прилипания к H_2O сначала с ростом δ суммарный

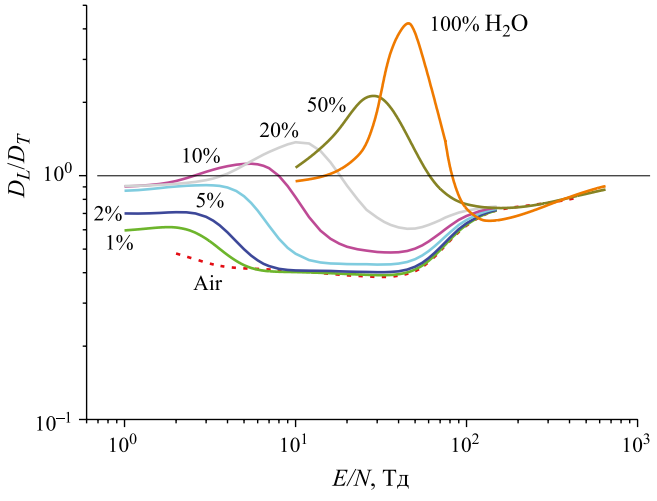

Рис. 10. Отношение коэффициентов продольной и поперечной диффузии электронов в смесях H_2O:воздух в зависимости от приведенного электрического поля. Расчеты для разных долей H_2O.

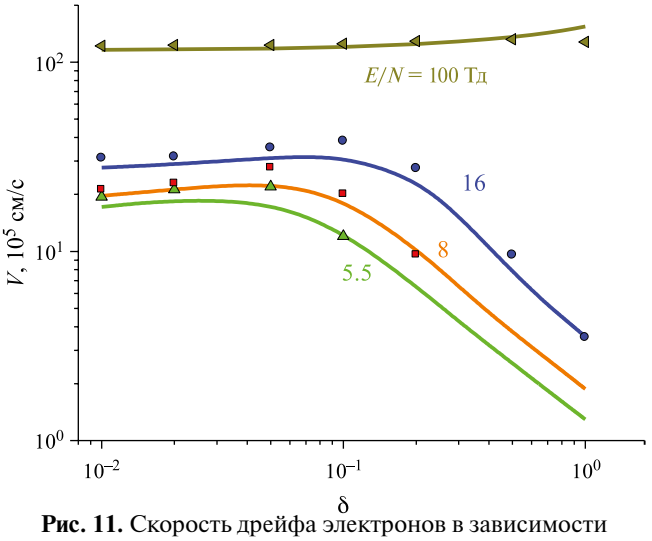

Рис. 11. Скорость дрейфа электронов в зависимости от мольной доли H_2O в смесях H_2O:воздух при различных значениях E/N. Кривые – данный расчет, точки – эксперимент [16].

коэффициент прилипания при E/N =40 Тд увеличивается. Но при достижении достаточно больших значений δ начинает резко снижаться средняя энергия электронов, и в дальнейшем это приводит к уменьшению скорости прилипания, в соответствии с данными на рис. 6.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что существенное различие в сечениях рассеяния электронов и их зависимостях от энергии электронов для молекул H_2O, с одной стороны, и молекул N_2 и O_2, с другой стороны, приводит к тому, что кинетические коэффициенты электронов сложным образом зависят в смесях H_2O:воздух от приведенного электрического поля E/N и состава смесей.

4. ВЫВОДЫ

На основе численного решения уравнения Больцмана в двучленном приближении вычислены скорость дрейфа электронов, коэффициенты их диффузии вдоль и поперек электрического поля и коэффициенты ионизации и диссоциативного прилипания в слабоионизованной плазме смесей воздуха с парами воды в широком диапазоне приведенных электрических полей и мольных долей молекул H_2O. При сравнении полученных результатов с новыми экспериментальными данными получено хорошее согласие между ними. Отсюда следует вывод о достаточной надежности использованных в данной работе наборов сечений упругого и неупругого взаимодействия электронов с молекулами N_2, O_2 и H_2O.

Соотношение между сечениями рассеяния электронов на молекулах H_2O и на молекулах N_2 и O_2 сильно зависит от энергии электронов. При малых энергиях сечения упругого и неупругого рассеяния на H_2O аномально велики из-за большого постоянного дипольного момента этих молекул. С ростом энергии эти сечения быстро падают и становятся меньше аналогичных сечений рассеяния электронов на N_2 и O_2. В результате получается разная зависимость коэффициентов переноса электронов и их средней энергии от мольной доли H_2O в смесях H_2O:воздух при малых и высоких электрических полях. При малых приведенных полях E/N увеличение содержания H_2O в смесях приводит к уменьшению коэффициентов переноса и средней энергии электронов, в то время как при больших значениях E/N наблюдается обратная тенденция. Кроме того, существуют области E/N, для которых наблюдается синергетический эффект, – здесь скорость дрейфа и коэффициент прилипания электронов в газовых смесях оказываются больше соответствующих величин в чистом воздухе или парах воды.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-30062).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fridman A.* Plasma chemistry. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
2. *Kong M.G., Kroesen G., Morfill G., Nosenko T., Shimizu T., van Dijk J., Zimmermann J.L.* // New J. Phys. 2009. V. 11. P. 115012.
3. *Starikovskiy A., Aleksandrov N.* // Progr. Energy Comb. Sci. 2013. V. 39. P. 61.
4. *Starikovskaia S.M.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2014. V. 47. P. 353001.
5. *Ju Y., Sun W.* // Progr. Energy Comb. Sci. 2015. V. 48. P. 21.
6. *Стариковский А.Ю., Александров Н.Л.* // Физика плазмы. 2021. Т. 47. С. 126.
7. *Gallimberti I.* // Pure Appl. Chem. 1988. V. 60. P. 663.
8. *Šimek M., Homola T.* // Eur. Phys. J. D. 2021. V. 75. P. 210.
9. *Starikovskiy A.Yu., Bazelyan E.M., Aleksandrov N.L.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2022. V. 31. P. 114009.
10. *Хаксли Л., Кромптон Р.* Диффузия и дрейф электронов в газах. М.: Мир, 1977.
11. *Gallagher J.W., Beaty E.C., Dutton J., Pitchford L.C.* // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1983. V. 12. P. 109.
12. *Pancheshnyi S., Biagi S., Bordage M., Hagelaar G., Morgan W., Phelps A., Pitchford L.* // Chem. Phys. 2012. V. 398. P. 148.
13. *Pitchford L.C. et all* // Plasma Process. Polym. 2017. V. 14. P. 1600098.
14. *Alves L.L., Bogaerts A., Guerra V., Turner M.M.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2018. V. 27. P. 023002.
15. *Ruiz-Vargas G., Yousfi M., de Urquijo J.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. V. 43. P. 455201.
16. *de Urquijo J., Gonzalez-Magana O., Basurto E., Juarez A.M.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2024. V. 57. P. 125205.
17. *Кочетов И.В., Александров Н.Л.* // Физика плазмы. 2019. Т. 45. С. 717.
18. *Kochetov I.V., Popov M.A., Aleksandrov N.L.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2019. V. 28. P. 025009.
19. *Hagelaar G.J.M., Pitchford L.C.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2005. V. 14. P. 722.
20. *Дятко Н.А., Кочетов И.В., Напартович А.П.* // Физика плазмы. 1992. Т. 18. С. 888.
21. TRINITI database, www.lxcat.net, retrieved on November 20, 2017.
22. *Александров Н.Л., Кончаков А.М.* // Физика плазмы. 1981. Т. 7. С. 185.
23. *Александров Н.Л., Кончаков А.М., Напартович А.П., Старостин А.Н.,* Химия плазмы, Вып. 11, С. 3, под ред. Б.М. Смирнова, М.: Энергоатомиздат, 1984.

KINETIC COEFFICIENTS OF ELECTRONS IN WEAKLY IONIZED PLASMA OF MIXTURES OF AIR WITH WATER VAPOR IN A STRONG ELECTRIC FIELD

I. V. Kochetov[a, b], N. L. Aleksandrov[c, d, *]

[a] *Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia*
[b] *Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, Moscow, 108840 Russia*
[c] *Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow oblast, 141701 Russia*
[d] *Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia*
**e-mail: nick_aleksandrov@mail.ru*

Abstract—Using a numerical solution of the Boltzmann equation, the electron drift velocity, the coefficients of their longitudinal and transverse diffusion, as well as the ionization and dissociative attachment coefficients in weakly ionized plasma of mixtures of air with water vapor are calculated in a wide range of reduced electric fields (1–650 Td, 1 Td = 10–17 V cm^2) and mole fractions of water vapor (0–1). The calculation results are compared with new experimental data, and good agreement between them is obtained. It is shown that for all coefficients and the average electron energy, their dependence on the gas composition changes with increasing electric field. At low reduced fields, an increase in the content of H_2O water molecules in mixtures leads to a decrease in the transport coefficients and average electron energy, while the opposite trend is observed at high fields. It is shown that for the drift velocity and electron attachment coefficient there are electric fields, in which these coefficients in gas mixtures can be greater than the coefficients in dry air and water vapor. A qualitative explanation is given for the obtained dependences of the electron coefficients on the electric field and H_2O content in the mixtures.

Keywords: electron transport coefficients, ionization and electron attachment coefficients, weakly ionized nonequilibrium plasma, strong electric field, electron scattering by molecules, mixtures of air with water vapor