

## Приведенная напряженность электрического поля в плазме разряда в кислороде по различным экспериментам

Шепеленко Александр Андреевич, кандидат физико-математических наук, доцент  
Физический институт им.П.Н. Лебедева РАН, Самарский филиал (г. Самара)

*Предлагается подборка значений приведенной напряженности электрического поля  $E/N$  в положительном столбе тлеющего разряда в кислороде, полученных в экспериментах различных авторов. Она может использоваться для тестирования теоретических моделей и для прогнозирования значений  $E/N$  при разработках разрядных устройств и их приложений.*

**Ключевые слова:** плазма, тлеющий разряд, кислород, напряженность электрического поля.

Разряд в кислороде является одним из наиболее исследованных, экспериментальные данные по нему получены во многих работах. Важнейшим параметром плазмы является приведенная напряженность электрического поля  $E/N$ , где  $E$  – напряженность электрического поля,  $N$  – концентрация молекул газа. Параметр  $E/N$  определяет дрейфовую скорость и коэффициенты диффузии электронов плазмы, их среднюю энергию и форму функции распределения по энергии, константы скоростей всех важнейших процессов. В плазме самостоятельного разряда параметр  $E/N$  устанавливается через механизмы обратной связи таким, что обеспечивается ионизационный баланс.

Рассчитывать значения параметра  $E/N$  позволяют теоретические модели плазмы, представленные в ряде работ за последние три десятилетия [1–3]. Но в этих работах тестирование моделей сравнением с экспериментом либо отсутствует [2, 3] либо проведено в небольшом объеме [1]. Без развернутой верификации теории экспериментом остаются не установленными точность предложенных моделей и используемых в них характеристик элементарных процессов. Величины диапазона вероятного отклонения расчетных значений от экспериментальных остаются неизвестными.

Полученные в экспериментах значения, используемые для верификации теории, всегда определены с некоторой погрешностью, лучшей проверкой их надежности является сопоставление и согласие результатов экспериментов независимых групп. Сравнение результатов независимых экспериментов позволяет количественно оценивать величины возможного разброса значений исследуемого параметра при изменениях условий и параметров эксперимента.

Данная работа представляет обзор значений  $E/N$  в положительном столбе тлеющего разряда в кислороде, полученных измерениями в экспериментах различных групп [4–9]. Отмечаются некоторые особенности цитированных экспериментов, касающиеся возможных погрешностей при измерениях параметра  $E/N$ . Представленные в работе данные являются, по нашему мнению, наиболее надежными. Данные из работ [4, 7] здесь скорректированы проведением дополняющих расчетов температуры газа.

Во всех работах разрядные трубки были цилиндрическими, их радиальные размеры составляли 1.54, 1.5 см в [6, 8] и 0.8, 0.63, 0.3 см [4, 5, 9], соответственно. Напряженность поля  $E$  во всех работах измерялась зондами. Плотности газа на оси разрядной трубки  $N_0$  определялась по измеренным давлениям и температурам газа на оси трубки  $T_0$ . Температура  $T_0$  в [6, 8] измерялась с помощью термопар, в [9] – методом эмиссионной спектроскопии.

Результаты представлены на рис.1.

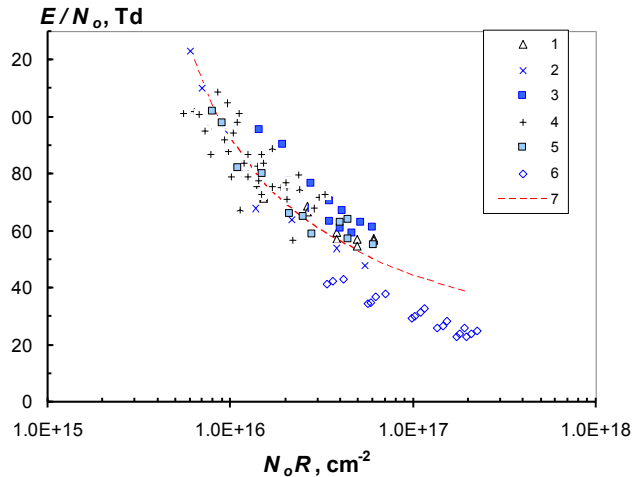


Рис. 1. Значения параметра приведенной напряженности электрического поля  $E/N_0$  в зависимости от параметра  $N_0 R$  по результатам экспериментов: 1 – работа [4]; 2 – [5]; 3 – [6]; 4 – [7]; 4 – [7]; 5 – [8]; 6 – [9] и 7 – по расчетам (см. текст).

Температура  $T_0$  в работах [4, 7] не измерялась. Авторы этих экспериментов не принимали во внимание нагрев газа разрядом. Это допустимо только в случаях, когда температура газа  $T_0$  на оси трубки мало отличается от температуры газа у стенки  $T_w$ . В данной работе результаты из [4, 7] скорректированы расчетами температуры  $T_0$ . Точность примененного метода расчета температуры была проверена тестированием по результатам экспериментов из работы [6], в которой в дополнение к  $T_0$  приведены измеренные значения температуры стенки  $T_w$ . На рис. 1 приведена также зависимость, полученная по методике приближенного расчета, описание которой будет дано в отдельной публикации.

Величины  $E/N_0$  работы [9], несомненно, содержат систематические погрешности, источник которых в работе был указан, их величина показана экспериментально. Неточности связаны с тем, что форма спектральной полосы излучения, по которой определялась температура  $T_0$ , складывается как суммарная от излучения источников, располагающихся в цилиндрическом объеме с поперечным размером  $r_{\text{diag}}$ . Поэтому найденная температура  $T_{\text{diag}}$  представляет собой некое усредненное по этому объему значение. Усреднение приводит к занижению значения  $T_{\text{diag}}$  по отношению к температуре на оси  $T_0$  и, следовательно, к занижению значений  $E/N_0$ . Такое занижение значений  $E/N_0$  тем больше, чем больше градиент температуры. Эксперименты [9] проводились с большими  $N_0 R$ , были большими нагревы и градиенты температуры газа, поэтому занижения значений  $E/N_0$  были значительными. Тем не

менее, данные работы [9] очень полезны — это единственный источник значений  $E/N_0$  в диапазоне больших  $N_0R$ .

Аналогичная причина, несомненно, приводила к занижению значений  $E/N$  в многократно цитированной работе [10]. В этой работе концентрация  $N$  определялась по измерению поглощения зондирующего УФ излучения выбранных спектральных полос. Радиальный размер области, через которую проходило зондирующее излучение, составлял от 0.2 см на входе до полного радиуса трубки 0.8 см на выходе. Поэтому полученные в работе [10] значения концентрации  $N$  представляют собой величины, усредненные по такой области. Полученные величины  $E/N_0$  значительно ниже величин на оси трубки  $E/N_0$ , поэтому эти данные не включены в представленную здесь подборку значений.

Как видно из рис.1, величины  $E/N_0$ , отвечающие одним и тем же значениям параметра  $N_0R$ , по экспериментам различных авторов заметно различаются. Величина  $E/N_0$ , очевидно, зависит не только от важнейшего параметра  $N_0R$ , но и от других параметров, один из которых — величина тока. Результаты измерений, показывая, что при неизменном параметре  $N_0R$  увеличение тока вызывает снижение  $E/N_0$ , но не большое. Например, в работе [6]  $E/N_0$  при давлении 1.6 Тор снижается от 63 до 61 Td (1Td =  $1 \times 10^{17}$  Всм<sup>2</sup>) при изменении тока от 40 до 120 мА; в работе [7] при давлении 1.3 Тор от  $\approx 80$  до  $\approx 75$  Td при изменении тока от 20 до 50 мА. Заметим, что влияние нагрева, возрастающего при увеличении тока, должно вызывать вследствие изменения плотности газа не снижение, а возрастание  $E/N_0$ . Это нетрудно установить из рассмотрения на качественном уровне, и было проверено нами моделирующими расчетами. Факт наблюдаемого при росте тока снижения  $E/N_0$ , по нашему мнению, объясняется иным механизмом. Он состоит в увеличении концентрации в плазме частиц, вызывающих отлипание электронов от отрицательных ионов. Это дает увеличение частоты отлипания и увеличение размера периферийной оболочки, формирующейся в плазме с отрицательными ионами [2].

В вариантах с пренебрежимо малым влиянием фактора величины тока величины  $E/N_0$  различаются по результатам различных экспериментов. Заметный разброс значений  $E/N_0$  при одном и том же значении параметра  $N_0R$  наблюдается не только по различным экспериментам, но и в работах одной группы, например, в [10], или в [6] и [8]. Тем не менее, значения  $E/N_0$  при равных значениях  $N_0R$  по экспериментам различных групп, как видно из рис. 1, воспроизводятся с точностью около 20%. Вероятные причины возможных погрешностей в работах не обсуждаются.

Назовем вероятные причины несовпадения значений  $E/N_0$  измеренных в различных экспериментах. Экспериментальные условия, очевидно, всегда содержат некоторые неконтролируемые факторы. Различия в результатах из-

мерений величины  $E/N_0$  порождаются, на наш взгляд, в основном не точным воспроизведением следующих параметров и факторов: 1) температура стенки; 2) состояние поверхности диэлектрической стенки разрядной трубки; 3) количество и состав малых неконтролируемых примесей в газе.

Температура стенки  $T_w$  в ряде работ не измерялась. Даже при не сильных нагревах газа разрядом,  $T_w$  в разных экспериментах могли различаться на 5 — 10 градусов К и более из-за различий условий охлаждения и температур помещений, в которых проводились измерения. Состояние стенок трубки при горении разряда изменяется. На стенке образуется напыление металлов, распыляемых с поверхности катода, и их окислов. Образование такого напыления происходит тем быстрее, чем больше ток разряда. Такие изменения состояния поверхностей стенок могут значительно, до нескольких раз, изменять величину коэффициента гетерогенной рекомбинации атомов кислорода. Это может приводить к значительному изменению концентрации атомарного кислорода и других параметров, в частности, вызывать изменения концентрации отрицательных ионов и параметра  $E/N_0$ . Например, в наших экспериментах [11] в основном из-за накопления напыления на стенках результаты повторных измерений концентрации синглетного дельта кислорода различались на 10—20% при равных контролируемых параметрах. Не исключено, что какие-то из экспериментов проводились с кислородом, в котором присутствовали неконтролируемые малые примеси, такие как пары воды, остаточные примеси азота и аргона.

Наиболее надежными, по нашему мнению, являются данные, полученные в работе [6] с измерениями температуры газа термометрами. При таком методе диагностики в плазму неизбежно вносятся некоторые возмущения. Но методика измерений авторами внимательно отработывалась, можно предполагать, что погрешности были малыми. При таком методе измерения  $T_0$  размер усредняемой области диагностики, очевидно, меньше, чем при измерениях методом эмиссионной спектроскопии.

Можно заключить, что значения величины  $E/N_0$  при равных значениях  $N_0R$  в различных экспериментальных условиях воспроизводятся в пределах  $\pm 20\%$ . Представленная подборка данных, по нашему мнению, применима и достаточна для тестирования теоретических моделей. Кроме того, она позволяет, усредняя и аппроксимируя данные различных экспериментов, получать прогнозные значения параметра  $E/N_0$  (для цилиндрической геометрии плазменного объема). Расхождения таких значений с теми, что реализуются в эксперименте, на наш взгляд, вполне приемлемы для многих прикладных задач.

### Литература:

1. Ferreira C.M., Gousset G., Touzeau M. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1988. V. 21. P. 1403–1413.
2. Цендин Л.Д. // ЖТФ. 1989. Т. 59. В. 1. С. 21.
3. Головицкий А.П., Цендин Л.Д. // ЖТФ. 2014. Т. 84. В. 3. С. 44–49.
4. Rundle H.W., Gillespie K.A., Yealland R.M. et al. // Canad. Journal of Chemistry. 1966. V. 44. P. 2995.
5. Sabadil H. // Beitr. Plasmaphys. 1971. Bd. 1. H. 42. S. 763.
6. Максимов А.И., Рыбкин В.В. // ЖПС. 1982. Т. XXXVII. № 1. С. 33 — 38.
7. Ichikawa Y. // J. Appl. Phys. 1990. V. 67 (1). P. 108–114.
8. Рыбкин В.В., Бессараб А.Б., Максимов А.И. // ТВТ. 1996. Т. 34. № 2. С. 181 — 184.
9. Зырянов С.М., Лопавев Д.В. // Физика плазмы. 2007. Т. 33. № 6. С. 563–574.
10. Gousset G., Panafieu P., Touzeau M., Vielle M. // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 1987.V.7.N.4. P. 409–427.
11. Шепеленко А.А., Курьяев Н.В., Михеев П.А. // ТВТ. 2012. Т. 50. № 1. С. 143–150. [Shepelenko AA, Kurpyaev NV, Mikheyev PA. High Temperature 2012, V. 50, 1. P. 137–144]