

УДК 535.33

**СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДОЗВУКОВЫХ ПОТОКОВ  
ВОЗДУШНОЙ ПЛАЗМЫ ПЛАЗМОТРОНОВ ВГУ-4 И ВГУ-3,  
ИЗМЕРЕННЫХ ПО ЭМИССИОННЫМ СПЕКТРАМ**

© 2003 г. Н.Г. Быкова\*, **И.С. Першин**\*\*

\* *Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова*

\*\**Институт проблем механики РАН, Москва*

Поступила в редакцию ХХ.12.2003 г.

Для дозвуковых потоков воздушной плазмы, генерируемых на плазмотронах ВГУ-3 и ВГУ-4 ИПМ РАН, по абсолютной интенсивности спектральных линий атомов азота и кислорода измерены значения средних по диаметру струи температур в зависимости от параметров разряда, а также релаксация температуры вниз по потоку. Методом сопоставления расчетных и экспериментальных спектров излучения молекулярных компонент воздушной плазмы измерены зависимости колебательно-вращательной температуры, а также концентраций иона  $N_2^+$  и молекулы  $N_2$  от параметров разряда и изменение этих параметров плазмы вниз по потоку. Измеренные молекулярные концентрации сопоставлены с расчетными равновесными значениями. Полученные экспериментальные данные для обеих установок сопоставлены друг с другом.

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в ряде европейских стран введены в строй индукционные плазмотроны разной геометрии и мощности, на которых испытываются теплозащитные материалы (ТЗМ) для космических летательных аппаратов и проводятся измерения каталитичности материалов. В связи с этим становится актуальным вопрос о сопоставимости результатов, полученных на разных плазмотронах, иными словами, о степени соответствия условий моделирования натурального теплообмена, а также о том, в какой мере существующие отличия могут влиять на результаты соответствующих испытаний и измерений.

В лаборатории механики воздействия плазмы на материалы ИПМ РАН за многие годы работы накоплен большой экспериментальный опыт по испытанию ТЗМ, измерению каталитичности различных материалов и в диагностике плазменных потоков. В настоящее время в лаборатории проводятся исследования на двух индукционных плазмотронах разной мощности и геометрии ВГУ-4 и ВГУ-3. В данной работе приводятся результаты сравнения параметров дозвуковых потоков воздушной плазмы, генерируемых на этих плазмотронах, полученные на основе анализа эмиссионных спектров.

**Описание экспериментальных установок.** Основные характеристики индукционных плазмотронов ВГУ-3 и ВГУ-4 приведены в таблице 1.

Параметр	ВГУ-3	ВГУ-4
Частота генерации	400 кГц	1,76 МГц
Диаметр разрядного канала ( $D_c$ )	150 мм	80 мм
Индуктор	4 витка (220 мм)	5 витков (150 мм)
Расстояние от индуктора до среза разрядного канала	~200 мм	~100 мм
Расстояние от индуктора до инжектора газа	~200 мм	~100 мм
Диапазон изменения мощности по анодному питанию	100 - 500 кВт	20 - 72 кВт
Диапазон изменения давления газа	25 - 1000 гПа	20 - 100 гПа
Оптимальное значение массового расхода воздуха для длительной, стабильной генерации	11 г/с	2,4 г/с

На рис. 1 приведена принципиальная схема спектральных измерений. Оптическая часть установки состоит из сферического зеркала 5, создающего уменьшенное изображение плазменной струи в плоскости входного отверстия ( $\varnothing 50 \mu\text{m}$ ) световода 6, который передает излучение на вход встроенного в персональный компьютер дифракционного спектрометра S1000, снабженного диодной линейкой из 1024 элементов. Для получения серии спектров вниз по потоку (ось Z) зеркало, держатель светофильтров и входная часть световода крепятся на подвижной платформе 8.

Для диагностики плазменных потоков по спектральным линиям атомов азота и кислорода регистрация спектров осуществлялась в диапазоне 630 -

980 нм. Ширина аппаратной функция спектрометра (FWHM) в этом диапазоне длин волн составляет 3 нм. Полосы молекулярного излучения регистрировались в диапазоне 280 - 480 нм, где FWHM спектрометра составляет ~ 1 нм. Эмиссионные спектры плазменных потоков измерялись в абсолютных энергетических единицах, для чего предварительно осуществлялась калибровка оптической части установки по калибровочной вольфрамовой лампе.

В работе определялись средние по диаметру струи температуры атомов азота и кислорода, колебательная и вращательная температуры молекулы  $N_2^+$ , а также средние концентрации молекул  $N_2$ ,  $N_2^+$ , CN. При этом использовалась методика абсолютных интенсивностей спектральных линий, детальное описание которой с анализом погрешности измерений применительно к условиям настоящего эксперимента приведено в [1]; колебательная и вращательная температуры определялись методом наилучшего соответствия экспериментального и расчетного молекулярных спектров по всему исследуемому диапазону длин волн.

**Результаты измерения атомных температур.** Примеры спектров воздушной плазмы в диапазоне 630 - 980 нм для плазмотронов ВГУ-4 и ВГУ-3 приведены на рис. 2 а, б соответственно.

Из рисунков видно, что данная область спектра свободна от интенсивных молекулярных полос и насыщена атомными спектральными линиями, удобными для измерений. Методом АИ по трем кислородным линиям: 777, 845, 927 нм, и шести азотным линиям: 664, 746, 823, 869, 906, 940 нм для разных режимов генерации были определены значения средних по диаметру струи атомных температур плазмы. В расчетах использовались значения спектроскопических констант и величины погрешностей для вероятностей переходов соответствующих

спектральных линий из базы данных NIST [2]. В тех случаях, когда исследуемые спектральные линии представляли собой неразрешенные мультиплеты, соответствующие вероятности переходов рассчитывались с учетом статистических весов и вероятностей переходов всех компонент мультиплета. В программе автоматической обработки данных наряду со значениями температуры по каждой из исследуемых линий рассчитывалась и величина погрешности измерения.

Для плазмотрона ВГУ-4 зависимости атомных температур плазмы от параметров разряда приведены на рис. 3 а, б, а кривая релаксации температуры вниз по потоку - на рис. 3 в. Аналогичные температурные зависимости для плазмотрона ВГУ-4 представлены на рис. 4 а, б, в.

Из рис. 3, 4 видно, что для обоих плазмотронов величины атомных температур, измеренные по разным спектральным линиям (СЛ) в пределах погрешностей измерений (во всех случаях не превышающих 250 К для ВГУ-4 и 350 К - для ВГУ-3) совпадают, как для СЛ каждой компоненты плазмы, так и между обеими атомными компонентами. Это позволяет сделать вывод о том, что в исследуемом диапазоне давлений и температур основные по величине концентрации компоненты плазмы находятся в состоянии термодинамического и химического равновесия с температурой  $T_a$ , определяющей общую температуру плазмы. Уровень максимально достижимой температуры воздушного плазменного потока на плазмотроне ВГУ-3 на  $\sim 1500$  К выше, чем на ВГУ-4.

При общей схожести зависимостей  $T_a$  от параметров разряда для плазмотрона ВГУ-3 имеют место следующие особенности:

- 1) заметное насыщение роста температуры с увеличением мощности генерации, которое ограничивает уровень максимально достижимой температуры на срезе разрядного канала величиной  $\sim 9000$  К. Одной из

физических причин этого эффекта может быть значительный рост потерь энергии воздушной плазмы на излучение при температурах, превышающих 8000 К.

2) более глубокий и узкий минимум температуры плазмы при изменении давления газа (для ВГУ-3:  $\Delta T \approx 1500$  К при  $p_{\text{мин}} \sim 80$  гПа; для ВГУ-4  $\Delta T \approx 500$  К при  $p_{\text{мин}} \sim 200$  гПа), связанный, по визуальным наблюдениям, со значительными изменениями структуры и конфигурации свободной струи. Известные газодинамические расчеты течений равновесной индукционной плазмы [3] не описывают наблюдаемый эффект.

Степень релаксации температуры плазмы вниз по потоку на расстояниях, меньших диаметра разрядного канала, примерно одинакова для обеих установок.

**Методика определения параметров плазменных потоков по молекулярному спектру.** Для низкотемпературной воздушной плазмы молекулярные спектры, доступные для наблюдения на имеющейся спектральной аппаратуре, расположены в диапазоне длин волн 280 - 480 нм. Примеры соответствующих спектров для обоих плазмотронов с расшифровкой атомных линий и молекулярных полос приведены на рис. 5 а, б.

Отметим, что если интенсивности атомных СЛ для двух плазмотронов (рис. 2 а, б) различаются больше чем на порядок, то соответствующие интенсивности молекулярных полос практически одинаковы и слабо меняются с изменением режима генерации.

Наблюдаемый молекулярный спектр достаточно сложен, он состоит из излучения молекул  $N_2^+$ ,  $N_2$ , CN, NH. Относительный вклад этих молекул в суммарное излучение иллюстрирует пример на рис. 6 а, б, в, г. Из рисунка

видно, что основное излучение в этом диапазоне длин волн приходится на 1-ю отрицательную систему молекулы  $N_2^+$  ( $B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+$ ) (рис. 6а). Излучение молекулы  $N_2$  на переходе  $C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$  (2-ая положительная система) (рис. 6б) явно идентифицируется в суммарном спектре по '2'-ой и '1'-ой секвенциям (290 - 320 нм), в то время как '0'-ая, '-1'-ая и '-2'-ая секвенции излучения этой молекулы накладываются на интенсивные полосы  $N_2^+$ . Заметную величину в области '0'-ой секвенции  $N_2^+$  имеет излучение фиолетовой системы молекулы CN ( $B^2\Sigma^+ - X^2\Sigma^+$ ) (рис. 6в). В области 335 нм в спектре присутствует излучение радикала NH на переходе  $A^3\Pi - X^3\Sigma^-$  (рис. 6г).

Анализ приведенных выше особенностей исследуемого спектра показывает, что определение молекулярных температур возможно лишь по форме спектра молекулы  $N_2^+$ , представленного тремя основными секвенциями значительной интенсивности. Полученные таким образом значения  $T_v$ ,  $T_r$ , принимались при расчетах спектров других молекулярных составляющих. Поскольку для всех исследуемых спектров значения  $T_v$ ,  $T_r$  оказались в пределах погрешности их определения равными, то в дальнейшем речь идет о единой колебательно-вращательной температуре. Определение концентраций молекулярных компонент возможно на основе согласования наблюдаемых и расчетных спектров по абсолютной интенсивности при известном значении электронной температуры молекул, относительно которого нами рассматривались два варианта. В одном случае она приравнивалась измеренной атомной температуре, в другом - колебательной температуре молекул. Полученные таким образом усредненные по диаметру струи значения концентраций сопоставлялись с соответствующими расчетными равновесными величинами для молекул  $N_2^+$  и  $N_2$ . Эксперимент подтверждает сильную зависимость концентрации

молекулы  $N_2$  от температуры, и наилучшее согласие измеренной и равновесной концентраций достигается в предположении  $T_e = T_a$ . Измеренная концентрация  $N_2^+$  слабо зависит от температуры аналогично тому, как это имеет место для расчетной равновесной концентрации этого иона. В этом случае выбор между указанными выше вариантами практически невозможен.

Спектры указанных выше молекул рассчитывались по методике, описанной в работе [4], для интервала колебательной температуры 4000-8800 К с шагом 200 К и интервала вращательной температуры 4000-8500 К с шагом 500 К с учетом аппаратной функции спектрометра. Спектральные характеристики и вероятности соответствующих электронно-колебательных переходов этих молекул взяты из базы данных RADDEN [5], а вероятности вращательных переходов рассчитывались по программам ИБК RADDEN [5]. Предельные значения вращательных и колебательных чисел взяты из справочника [6]. Статистические суммы основных молекулярных компонент ( $N_2^+$ ,  $N_2$ , CN) как функции трех молекулярных температур рассчитывались отдельной программой по методике, описанной в [6].

Процедура согласования расчетных спектров с наблюдаемыми проводилась методом последовательных приближений. Параметры расчетного спектра, суммарного по всем молекулам, считались приемлемыми, если при вычитании его из экспериментального спектра оставалось плавно меняющееся фоновое распределение. Если это распределение заметно менялось на каком-либо участке спектра, то уточнялись концентрации тех или иных молекулярных компонент и процедура согласования спектров проводилась еще раз.

Представления о точности определения колебательно-вращательной температуры по спектру молекулы  $N_2^+$  можно получить из следующего примера: изменение  $T_v$  и  $T_r$  на  $\pm 400$  К меняет отношение интенсивностей '1'-ой и '0'-ой секвенций спектра этой молекулы на  $\pm 10$  %, что надежно детектируется.

Погрешность определения концентрации компонент зависит как от погрешности калибровки, меняющейся в диапазоне длин волн 300-480 нм от 10 до 2 %, так и от относительной интенсивности компоненты в суммарном спектре. В итоге, для молекулы  $N_2^+$  верхняя граница погрешности измерения концентрации составляет  $\sim 10$  %; для молекулы  $N_2$  - от 20 до 30 %.

Определяемые концентрации молекул CN и NH не несут дополнительной информации в силу примесного характера этих компонент, поэтому в дальнейшем не приводятся.

Достигнутую степень соответствия спектров, которая считалась приемлемой, иллюстрируют примеры рис. 7 а, б. На рис. 7 а спектр воздушной плазмы, наблюдаемый на установке ВГУ-4 при давлении газа 25 гПа, расходе 2,4г/с и мощности по анодному питанию 52 кВт, сопоставлен со спектром, рассчитанным при следующих параметрах:  $T_v=T_r=8400$  К,  $T_e=T_a=7000$  К,  $N_2^+$  ( $N_0=1.65 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup>), CN ( $N_0=3.7 \cdot 10^{10}$  см<sup>-3</sup>),  $N_2$  ( $N_0=1.2 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>), NH ( $N_0=1 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup>), N ( $N_0=3 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>). На рис. 7 б спектр воздушной плазмы, наблюдаемый на установке ВГУ-3 при давлении газа 20 гПа, расходе 11 г/с и мощности по анодному питанию 300 кВт, сопоставлен с расчетным спектром с параметрами:  $T_v=T_r=9100$  К,  $T_e=T_a=8500$  К,  $N_2^+$  ( $N_0=6.3 \cdot 10^{10}$  см<sup>-3</sup>), CN ( $N_0=5.4 \cdot 10^9$  см<sup>-3</sup>),  $N_2$  ( $N_0=3.5 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>), NH ( $N_0=2,4 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup>), N ( $N_0=1 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>), O ( $N_0=4.2 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>), H ( $N_0=3.8 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup>).



Рис. 7а демонстрирует полное соответствие спектров в исследуемом диапазоне длин волн, за исключением участка 320-340 нм, на который приходится излучение неустойчивого радикала NH. Можно уменьшить наблюдаемое расхождение, если допустить, что колебательно-вращательная температура NH значительно ниже температуры плазмы.

Для установки ВГУ-3 (рис. 7б) соответствие наблюдаемой молекулярной части спектра с расчетной можно считать приемлемым. Вместе с тем при температурах выше 7000 К в наблюдаемом спектре появляются сравнительно интенсивные СЛ атомов азота, кислорода и водорода. Излучение атомов водорода (линии серии Бальмера) корректно учитывается на основании базы данных NIST [2]. Достичь полного соответствия спектров по СЛ атомов азота и кислорода с использованием данных NIST [2] не удастся. Именно: для линий атома азота из области длин волн 421 - 426 нм с классом точности не выше 50 % требуется уменьшить значения вероятностей перехода из [2] в 8 - 20 раз. Для атома кислорода расчётные интенсивности линий 395 и 437 нм удовлетворительно согласуются с наблюдаемыми. Вместе с тем интенсивность линии 383 нм, идентифицируемой согласно [7] как линия атома O, не была рассчитана ввиду отсутствия соответствующих спектроскопических данных. Интенсивность атомной линии 389 нм коррелирует с линиями атома кислорода и азота, что свидетельствует, по всей видимости, о ее принадлежности к излучению какого-либо из этих элементов, однако подтверждающая это информация в доступных базах данных отсутствует. Принадлежность других слабых атомных линий, наблюдаемых в этой области спектра, не устанавливалась ввиду их неактуальности.

Отметим, что в исследуемых спектрах отсутствуют линии ионов O II и N II. Расчет показывает, что на используемой спектральной аппаратуре при температуре плазмы 9000 К присутствие этих компонент может быть обнаружено при концентрациях, превышающих  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ , в то время как расчетные равновесные концентрации ионов O II и N II составляют  $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$  при давлении 25 гПа и  $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$  при давлении 100 гПа.

**Результаты определения молекулярных температур и концентраций.** Результаты измерения колебательно-вращательной температуры в сопоставлении с атомной для обеих установок приведены на рис. 8 а, б, в.

Общий для обеих установок вывод, который следует из данных рис.8, состоит в том, что для воздушной плазмы при малых давлениях (20-25 гПа) и уровне атомной температуры  $\sim 7000 \text{ К}$  колебательно-вращательная температура молекул примерно на 1300 К выше  $T_a$ . С ростом атомной температуры разница между температурами уменьшается, что для ВГУ-3 удается проследить на интервале изменений  $T_a$  7000 - 9000 К.

Данные рис. 8 в показывают, что при более высоких давлениях газа колебательно-вращательная и атомная температуры совпадают при более низкой температуре плазмы. Обратим внимание на тот факт, что в этом случае при повышении температуры за 7000 К измеренные значения  $T_{v,r}$  оказываются ниже  $T_a$  и эта разница увеличивается с ростом температуры. На наш взгляд, это свидетельствует о возрастающей роли самопоглощения излучения на переходе В - X молекулы  $N_2^+$  при этих параметрах потока.

Зависимости колебательно-вращательной и атомной температур от давления газа (рис. 9) демонстрируют естественную закономерность, что при более высоком уровне температуры с ростом давления газа

термодинамическое равновесие достигается при более низком давлении газа.

Полученные данные показывают, что в идентичных по температуре ( $T_a$ ) и давлению газа условиях величина различия температур  $T_a$  и  $T_{v,r}$ , которую можно принять в качестве критерия отличия состояния плазмы от термодинамически равновесного, одинакова для обеих установок.

Данные по изменению  $T_{v,r}$  и  $T_a$  вниз по потоку представлены на рис. 10 а, б, в. До расстояний от среза разрядного канала, равных, по крайней мере, диаметру разрядного канала, термодинамическое состояние воздушной плазмы вниз по потоку сохраняется (рис. 10 б, в). На больших расстояниях, по данным рис. 10 а, атомная температура релаксирует вниз по потоку быстрее, чем колебательно-вращательная.

На рис. 11 а, б, в представлены экспериментальные данные по усредненным концентрациям молекул  $N_2^+$  и  $N_2$  в сопоставлении с соответствующими равновесными значениями, полученными в предположении  $T_e=T_a$ . Расчетные величины приведены с указанием погрешности, обусловленной ошибкой в измерении  $T_a$ .

Из рисунка видно, что измеренные значения концентраций иона  $N_2^+$  на обеих установках при разных режимах генерации всегда ниже равновесных значений. При малых давлениях имеет место различие не только в величинах концентрации, но и в характере изменения наблюдаемой и расчетной концентраций с ростом температуры. При давлении 100 гПа измеренные и расчетные величины концентраций растут с температурой подобным образом, различаясь при этом примерно в 3-5 раз. Так как концентрация  $N_2^+$  в исследуемом диапазоне температур меняется слабо, то измеренные средние по струе величины концентраций не претерпят заметных изменений при учете радиального распределения температуры.

Расхождения между измеренными и равновесными значениями концентрации молекулы  $N_2$  для обеих установок сходно, но само по себе имеет более сложный характер: при малых давлениях выше экспериментальные значения, а при больших давлениях - наоборот. Разница между данными измерений и расчетом растет с температурой при малых давлениях, в то время как при давлении 100 гПа отношение этих величин меняется лишь в пределах 0.3 - 0.5. Вполне возможно, что в силу сильной зависимости концентрации молекулы  $N_2$  от температуры, учет радиального распределения температуры по струе может изменить соотношение между измеренными и расчетными данными.

На рис. 12 представлены зависимости измеренных и расчетных концентраций от давления газа для двух установок при режимах генерации, в которых значения молекулярных температур близки.

Характер представленных зависимостей и соотношение между измеренными и расчетными данными как для иона  $N_2^+$ , так и для молекулы  $N_2$  подобны для обоих плазмотронов. Кривые равновесных значений концентрации  $N_2$  пересекаются с экспериментальной зависимостью в области 30-50 гПа, в то время как измеренные значения концентрации  $N_2^+$  во всем интервале давлений газа ниже данных расчета.

Изменение соотношения между расчетными и экспериментальными концентрациями для  $N_2^+$  и  $N_2$  при движении вниз по потоку (рис. 13 а, б, в) находится в полном соответствии с отмеченными выше зависимостями этих величин от температуры (рис. 11 а, б, в).

**Сопоставление характеристик дозвуковых потоков воздушной плазмы, генерируемых на плазмотронах ВГУ-3 и ВГУ-4.** При сравнении дозвуковых потоков воздушной плазмы обеих установок в сопоставимых условиях (около среза разрядного канала и близких

значениях давления газа) естественно исходить из зависимостей средней температуры плазмы от удельной мощности по анодному питанию (рис. 14 а). В первом приближении за удельную мощность установки ( $R$ ) примем величину мощности по анодному питанию, приходящуюся на единицу объема области разрядного канала, в пределах которой генерируемая ВЧ энергия вкладывается в плазму ( $V=S_{dc}\cdot H_i$ , где  $S_{dc}$  - площадь сечения разрядного канала,  $H_i$  - высота индуктора). На рис. 14а представлены измеренные значения атомной и колебательно-вращательной температур в зависимости от  $R$ . В общей области атомных температур (6900 - 7600 К), где зависимости  $T_a(R)$  линейны для обеих установок, их удается полностью совместить, умножив значения  $R$  для ВГУ-4 на коэффициент  $\beta \sim 0.6$ , при этом соответствующие кривые  $T_{v,r}(R)$  в пределах погрешности измерений также совмещаются, хотя разница между  $T_{v,r}$  и  $T_a$  превышает 1000 К. Величина  $\beta$ , по-видимому, обусловлена различием для обеих установок величин скин-слоя плазмы ( $\delta \sim 1/\sqrt{f}$ ), к.п.д. и относительной роли краевых эффектов.

На рис. 14 б сопоставлены измеренные зависимости концентрации молекулы  $N_2$  и иона  $N_2^+$  от величины атомной температуры для обеих установок. Представленные данные показывают, что для ВГУ-3 величины молекулярных концентраций ниже соответствующих значений для ВГУ-4: по иону  $N_2^+$  в  $2.7 \div 3.3$  раза, а по молекуле  $N_2$  - в  $3.2 \div 4.5$  раза. Это различие в силу относительно небольшой величины концентрации этих молекулярных компонент воздушной плазмы (меньше концентрации атомных компонент  $\sim 5$  порядков для  $N_2^+$  и 2-3 порядка для  $N_2$ ) не имеет большого значения для состояния плазмы в целом. Однако при изучении взаимодействия плазмы с поверхностью образцов это обстоятельство может иметь некоторое значение. В этом отношении информация о

химически активных ионах O II и N II, расчетные равновесные значения концентрации для которых в диапазоне температуры плазмы 7000 - 9000 К составляют  $10^{13}$  -  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>, представляет значительно больший интерес. Но чувствительность используемой спектральной аппаратуры не позволяет зарегистрировать указанные концентрации этих ионов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные измерения температуры и концентрации атомных и молекулярных компонент дозвуковых потоков воздушной плазмы, генерируемых на индукционных плазмотронах ВГУ-3 и ВГУ-4, позволяют заключить, что в интервале температур 6000-9000 К и диапазоне давлений газа 20 - 100 гПа термодинамическое состояние плазмы по атомным (основным по концентрации) компонентам близко к термодинамически и химически равновесному. Для обеих установок при давлениях 20-25 гПа наблюдаемые отклонения от ЛТР в смысле различия величин атомной и молекулярных температур сходны и по величине, и по влиянию параметров плазмы на степень отклонения. Другими словами, состояние плазменного потока определяется значением средней по диаметру струи атомной температуры и давлением газа, а не геометрическими и мощностными характеристиками индукционного генератора.

Вместе с тем эксперимент показывает, что средние по диаметру струи значения концентрации неосновных молекулярных компонент  $N_2$  и  $N_2^+$  отличаются от равновесных почти для всех режимов генерации для обеих установок. Общими для обоих плазмотронов является характер зависимости указанных концентраций от параметров плазмы. Установлено, что при равных температурах и близких давлениях газа концентрации  $N_2$  и  $N_2^+$  в плазменных потоках сравниваемых установок различаются в 3 - 4 раза. Слабая зависимость концентрации иона  $N_2^+$  от

температуры влечет за собой слабую её зависимость по радиусу, поэтому средняя по диаметру струи величина концентрации - вполне самостоятельная характеристика струи. Напротив, сильная зависимость концентрации  $N_2$  от температуры должна приводить к существенно неравномерному её распределению по радиусу струи.

Работа выполнена при поддержке МНТЦ (проект 1549) и РФФИ (код проекта 02-01-00870).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быкова Н.Г., Кузнецова Л.А. // М.: Препринт № 682, ИПМ РАН, 2001.
2. Database for atomic spectroscopy (DAS) National Institute of Standards and Technology. USA.
3. Васильевский С.А., Колесников А.Ф. // МЖГ, 2000, № 5, С. 164.
4. Кузнецова Л.А., Кузьменко Н.Е., Кузяков Ю.Я., Пластинин Ю.А. // Вероятности оптических переходов двухатомных молекул. М.: Наука, 1980. 320 с.
5. Кузнецова Л.А., Пазюк Е.А., Столяров А.В. // Журнал физической химии. 1993. т.67. №11. с. 2271.
6. Гурвич Л.В., Вейтц И.В., Медведев В.А. и др. // Термодинамические свойства индивидуальных веществ. М.: Наука, 1978.
7. Reader J., Corliss C.H. // Wavelength and transition probabilities for atoms and atomic ions, Part I, NSRDS, 1980.



## 8. К статье Н.Г. Быкова, И.С. Першин «Сравнение параметров ...»

### Подписи к рисункам

**Рис. 1.** Принципиальная схема эксперимента: 1 - плазменная струя; 2 - кварцевая трубка, ограничивающая разрядный канал; 3 - индуктор; 4 - барокамера; 5 - вогнутое зеркало; 6 - световод; 7 - светофильтры; 8 - подвижная платформа; 9 - спектрометр.

**Рис. 2.** Примеры спектров дозвуковых потоков воздушной плазмы: (а) плазмотрон ВГУ-4  $N_{ан}=45$  кВт,  $p=100$  гПа,  $G=2.4$  г/с; (б) плазмотрон ВГУ-3  $N_{ан}=250$  кВт,  $p=20$  гПа,  $G=11$  г/с.

**Рис. 3.** (ВГУ-4) Зависимости средней по диаметру струи температуры воздушной плазмы вблизи среза канала: (а) от мощности по анодному питанию для  $p = 100$  гПа (черные символы) и для  $p=25$  гПа (серые символы); (б) от давления газа при  $N_{ан} = 45$  кВт и (в) от расстояния до среза разрядного канала при  $N_{ан} = 45$  кВт,  $p = 100$  гПа (черные символы) и  $p=25$  гПа (серые символы).  $G = 2.4$  г/с.  $\circ$  - по линиям ОI: 777, 845, 927 нм;  $\Delta$  - по линиям NI: 664, 745, 822, 868, 905, 939 нм.

**Рис. 4.** (ВГУ-3) Зависимости средней по диаметру струи температуры воздушной плазмы на расстоянии  $Z=55$  мм от среза канала (а) от мощности по анодному питанию для  $p=20$  гПа; (б) от давления газа при  $N_{ан} = 250$  кВт и (в) от расстояния до среза разрядного канала при  $N_{ан} = 250$  кВт,  $p = 22$  гПа.  $G = 11$  г/с.  $\circ$  - по линиям ОI: 777, 845, 927 нм;  $\Delta$  - по линиям NI: 664, 745, 822, 868, 905, 939 нм.

**Рис. 5.** Примеры спектров воздушной плазмы в диапазоне длин волн 280 - 480 нм: (а) ВГУ-4,  $N_{\text{ан}}=45$  кВт,  $p=25$  гПа,  $G=2.4$  г/с; (б) ВГУ-3,  $N_{\text{ан}}=250$  кВт,  $p=25$  гПа,  $G=11$  г/с.

**Рис. 6.** Относительный вклад разных молекулярных компонентов в спектр излучения воздушной плазмы: точки - экспериментальный спектр; сплошные линии - расчетные спектры  $N_2^+_{\text{BX}}$  (а),  $N_2_{\text{CB}}$  (б),  $CN_{\text{BX}}$  (в),  $NH_{\text{AX}}$  (г).

**Рис. 7.** Пример соответствия расчетного спектра (линия 2) и экспериментального спектра (точки): (а) для ВГУ-4 при  $N_{\text{ан}}=52$  кВт,  $p=25$  гПа,  $G=2.5$  г/с; (б) для ВГУ-3  $N_{\text{ан}}=300$  кВт,  $p=20$  гПа,  $G=11$  г/с; 1 - фоновое распределение.

**Рис. 8.** Зависимости колебательно-вращательной и атомной температур от мощности по анодному питанию: (а) ВГУ-3,  $p = 20$  гПа,  $G = 11$  г/с,  $Z \sim 55$  мм; (б) ВГУ-4,  $p = 25$  гПа,  $G = 2.5$  г/с,  $Z \sim 10$  мм; (в) ВГУ-4,  $p = 100$  гПа,  $G = 2.5$  г/с,  $Z \sim 10$  мм.  $\blacktriangle$  -  $T_v = T_r$ ;  $\bullet$  -  $T_a$ .

**Рис. 9.** Зависимости колебательно-вращательной и атомной температур от давления: (а) ВГУ-4,  $N_{\text{ан}}=45$  кВт,  $G=2.5$  г/с,  $Z\sim 10$  мм; (б) ВГУ-3,  $N_{\text{ан}}=250$  кВт,  $G=11$  г/с,  $Z=55$  мм.  $\blacktriangle$  -  $T_v=T_r$ ;  $\circ$  -  $T_a$ .

**Рис. 10.** Данные по релаксации колебательно-вращательной и атомной температур вниз по потоку: (а) ВГУ-3,  $N_{\text{ан}}=250$  кВт,  $p=25$  гПа,  $G=11$  г/с; (б) ВГУ-4,  $N_{\text{ан}}=45$  кВт,  $p=25$  гПа,  $G=2.4$  г/с; (в) ВГУ-4,  $N_{\text{ан}}=45$  кВт,  $p=100$  гПа,  $G=2.4$  г/с.

**Рис. 11.** Зависимости концентраций  $N_2^+$  и  $N_2$  от температуры плазмы в сопоставлении с равновесными значениями: (а) ВГУ-3,  $p=20$  гПа,  $Z= 55$  мм,  $G=11$  г/с; (б) ВГУ-4,  $p=25$  гПа,  $Z= 10$  мм,  $G=2.5$  г/с; (в) ВГУ-4,  $p=100$  гПа,  $Z= 10$  мм,  $G=2.5$  г/с.  $N_2^+$ : ● - эксперимент, ○ - равновесные;  $N_2$ : ▲ - эксперимент, Δ - равновесные.

**Рис. 12.** Зависимости концентраций  $N_2^+$  и  $N_2$  от давления газа в сопоставлении с равновесными значениями: (а) ВГУ-3,  $N_{\text{ап}}=250$  кВт,  $Z= 55$  мм,  $G=11$  г/с; (б) ВГУ-4,  $N_{\text{ап}}=45$  кВт,  $Z= 10$  мм,  $G=2.5$  г/с.  $N_2^+$ : ● - эксперимент, ○ - равновесные;  $N_2$ : ▲ - эксперимент, Δ - равновесные.

**Рис. 13.** Зависимости концентраций  $N_2^+$  и  $N_2$  от расстояния до среза разрядного канала в сопоставлении с равновесными значениями: (а) ВГУ-3,  $p=25$  гПа,  $N_{\text{ап}}= 250$  кВт,  $G=11$  г/с; (б) ВГУ-4,  $p=25$  гПа,  $N_{\text{ап}}= 45$  кВт,  $G=2.5$  г/с; (в) ВГУ-4,  $p=100$  гПа,  $N_{\text{ап}}= 45$  кВт,  $G=2.5$  г/с.  $N_2^+$ : ● - эксперимент, ○ - равновесные;  $N_2$ : ▲ - эксперимент, Δ - равновесные.

**Рис. 14.** (а) Зависимости температур дозвуковых потоков воздушной плазмы от плотности мощности: ВГУ-3,  $p=20$  гПа,  $G = 11$  г/с, с  $Z/D_c =0.37$ , ● -  $T_a$ , ▲ -  $T_v$ ; ВГУ-4,  $G = 2.5$  г/с,  $Z/D_c = 0,13$ ,  $p=25$  гПа: ○ -  $T_a$ , Δ -  $T_v$ ;  $p=100$  гПа: х -  $T_a$ , ∇-  $T_v$ . (б) Зависимости концентраций молекулярных компонент в дозвуковых потоках воздушной плазмы от температуры (б): ВГУ-3,  $p=20$  гПа,  $G = 11$  г/с,  $Z/D_c =0.37$ , ● -  $N_2^+$ , ▲-  $N_2$ ; ВГУ-4,  $G = 2.5$  г/с,  $Z/D_c =0.13$ ,  $p=25$  гПа: ○ -  $N_2^+$ , Δ -  $N_2$ ;  $p=100$  гПа: × -  $N_2^+$ , ∇-  $N_2$ .

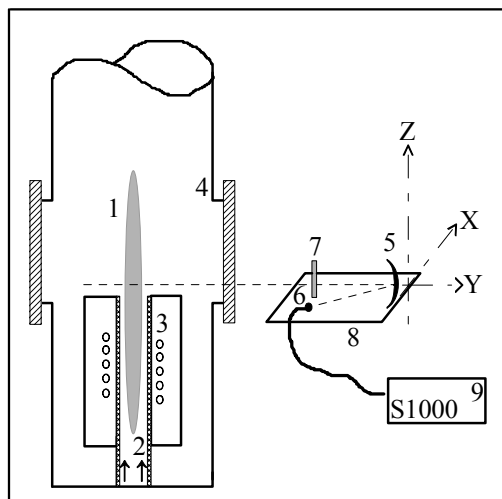


Рис. 1. Н.Г. Быкова, И.С. Першин, Сравнение параметров ...

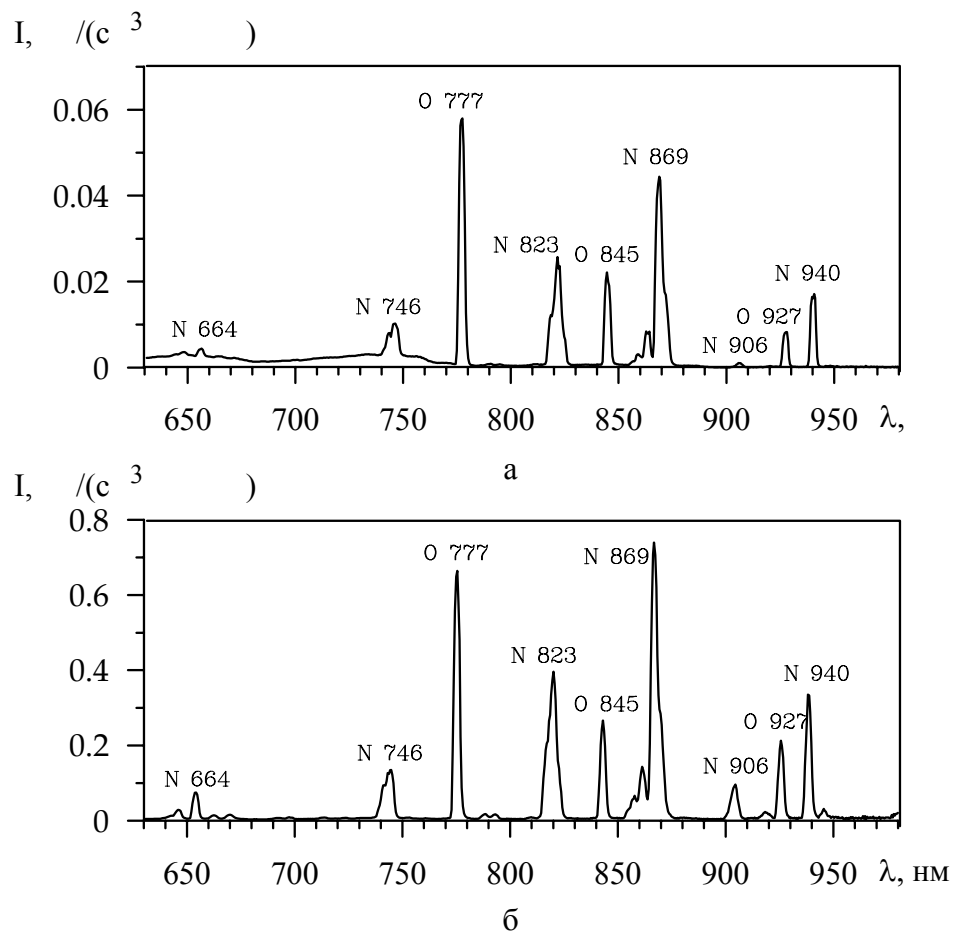


Рис. 2. Н.Г. Быкова, И.С. Першин, Сравнение параметров ...

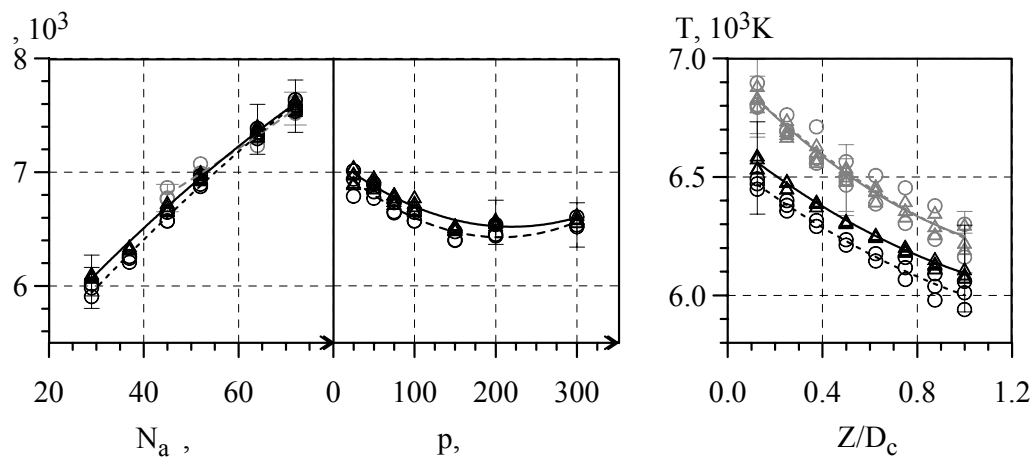


Рис. 3. Н.Г. Быкова, И.С. Першин, Сравнение параметров ...

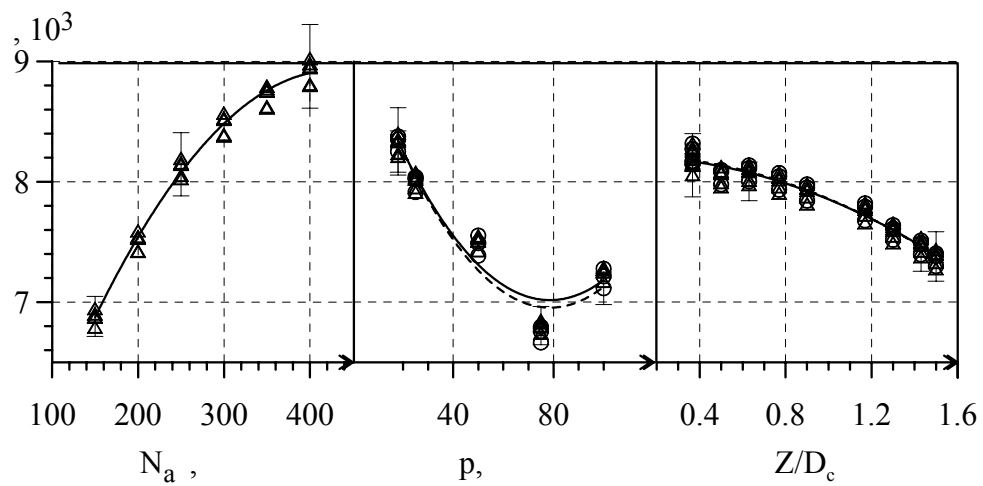


Рис. 4. Н.Г. Быкова, И.С. Першин, Сравнение параметров ...

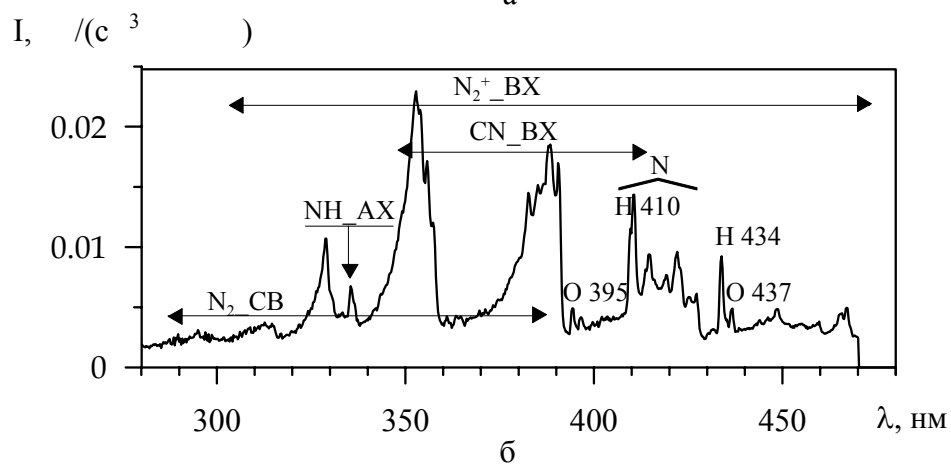
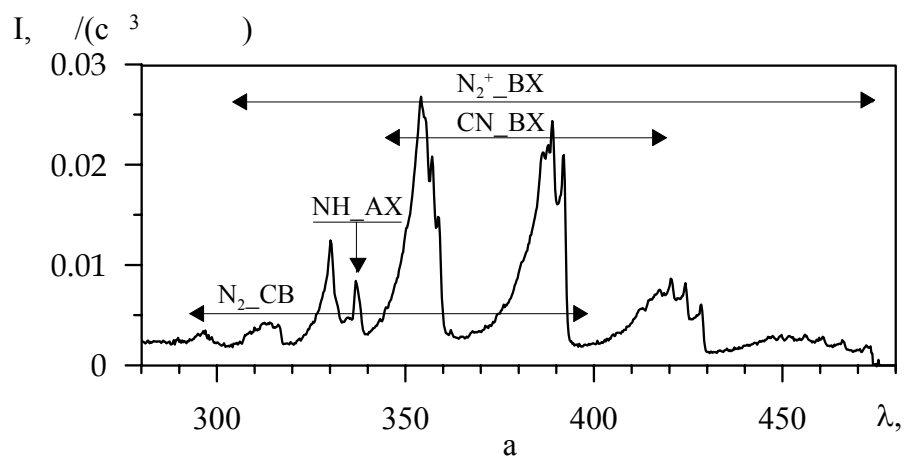


Рис. 5. Н.Г. Быкова, И.С. Першин, Сравнение параметров ...



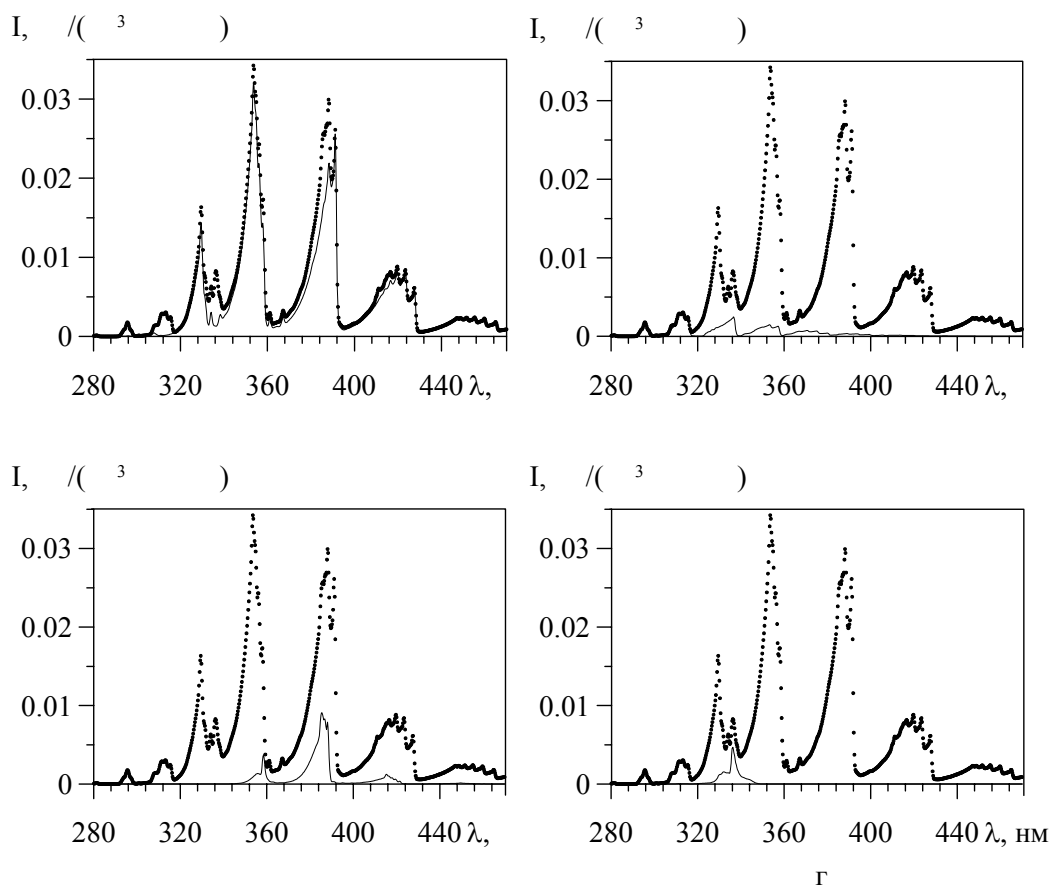


Рис. 6. Н.Г. Быкова, И.С. Першин, Сравнение параметров ...

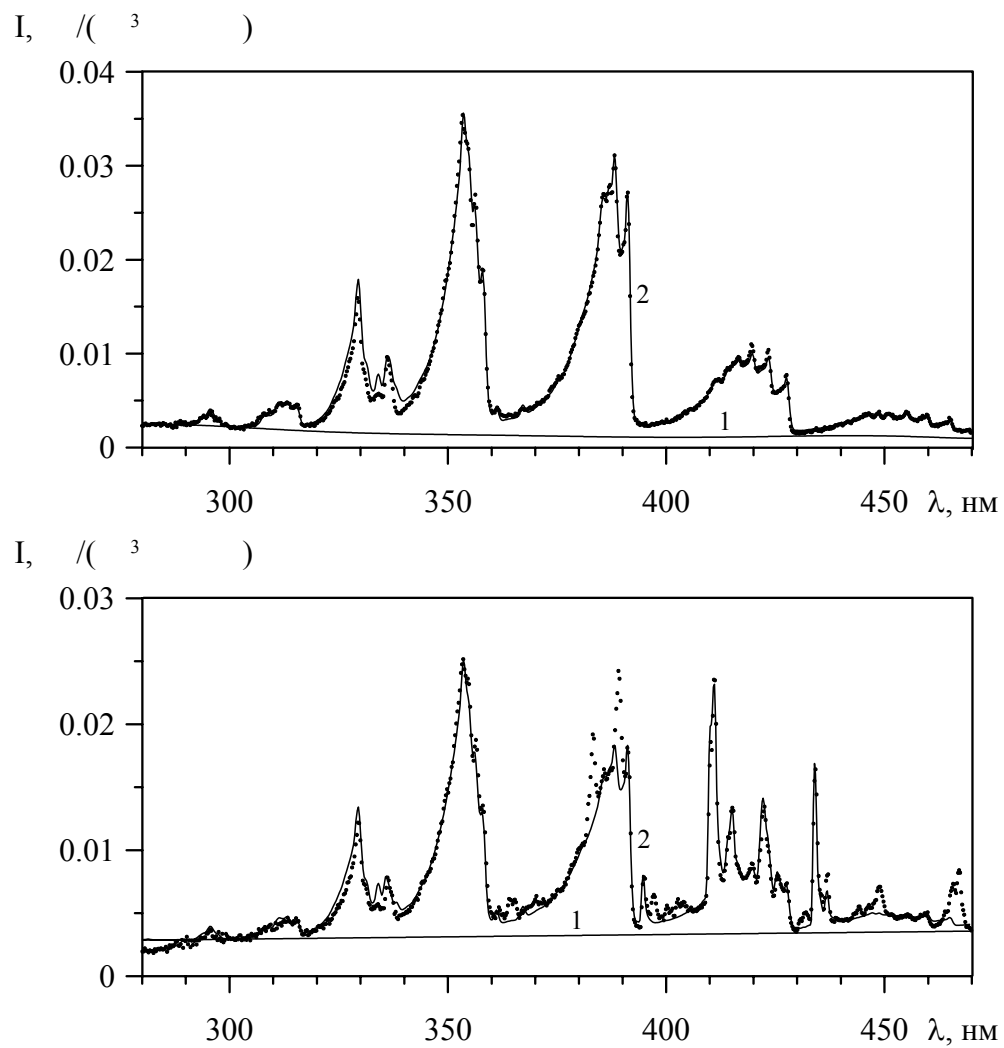


Рис. 7. Н.Г. Быкова, И.С. Першин, Сравнение параметров ...

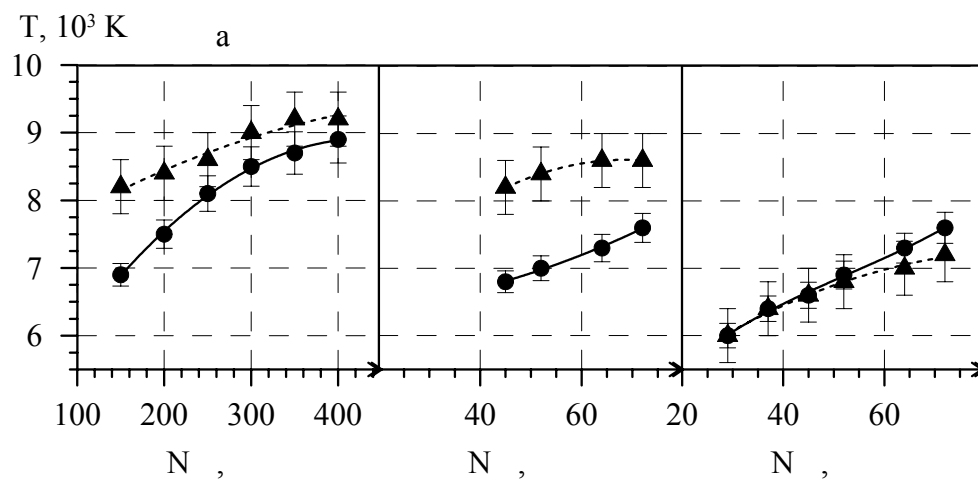


Рис. 8. Н.Г. Быкова, И.С. Першин, Сравнение параметров ...

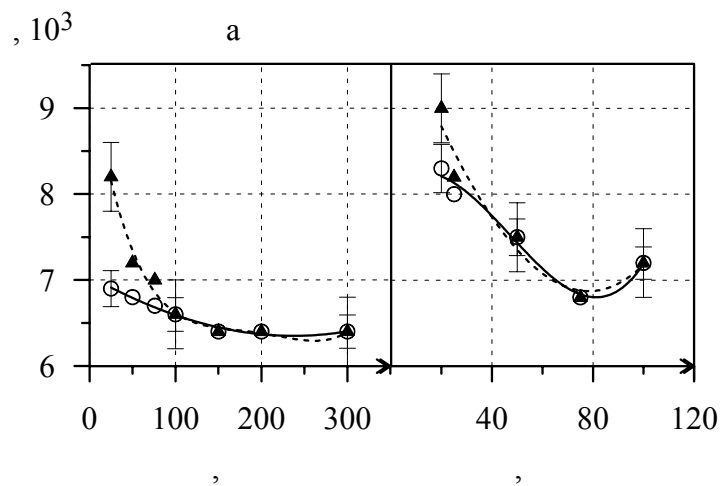


Рис. 9. Н.Г. Быкова, И.С. Першин, Сравнение параметров ...

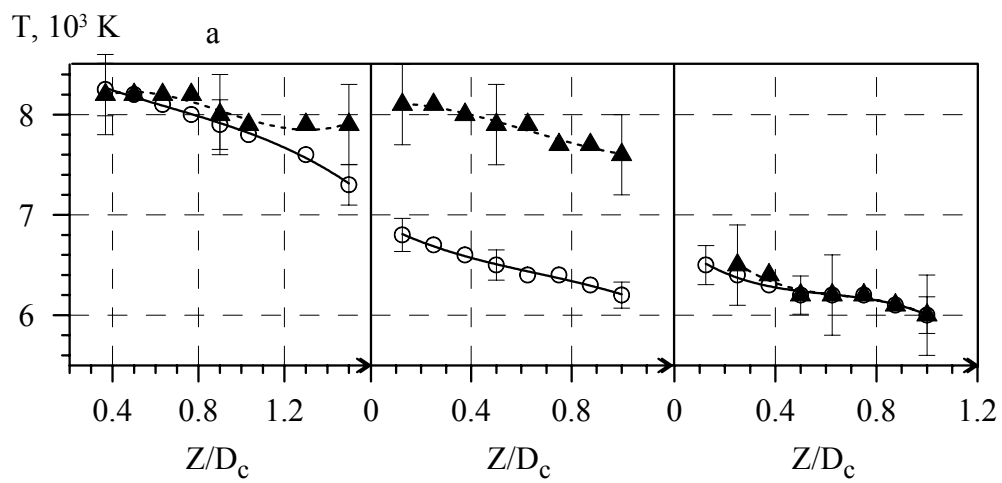


Рис. 10. Н.Г. Быкова, И.С. Першин, Сравнение параметров ...

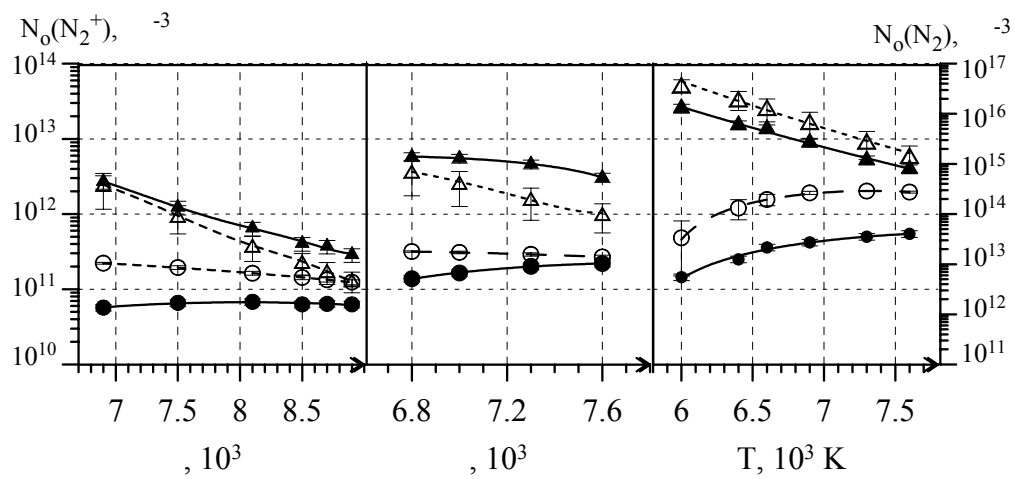


Рис. 11. Н.Г. Быкова, И.С. Першин, Сравнение параметров ...

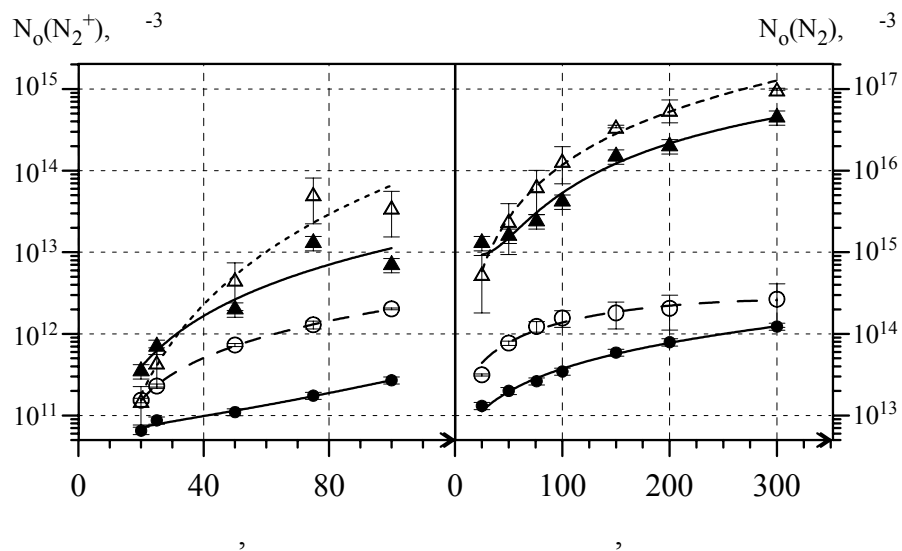


Рис. 12. Н.Г. Быкова, И.С. Першин, Сравнение параметров ...

$N_0(N_2^+), \cdot 10^{-3}$

$N_0(N_2), \cdot 10^{-3}$

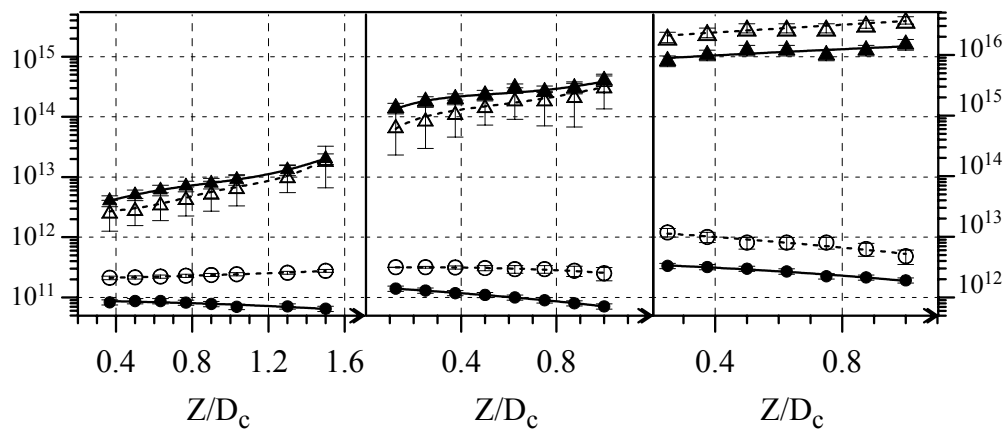


Рис. 13. Н.Г. Быкова, И.С. Першин, Сравнение параметров ...



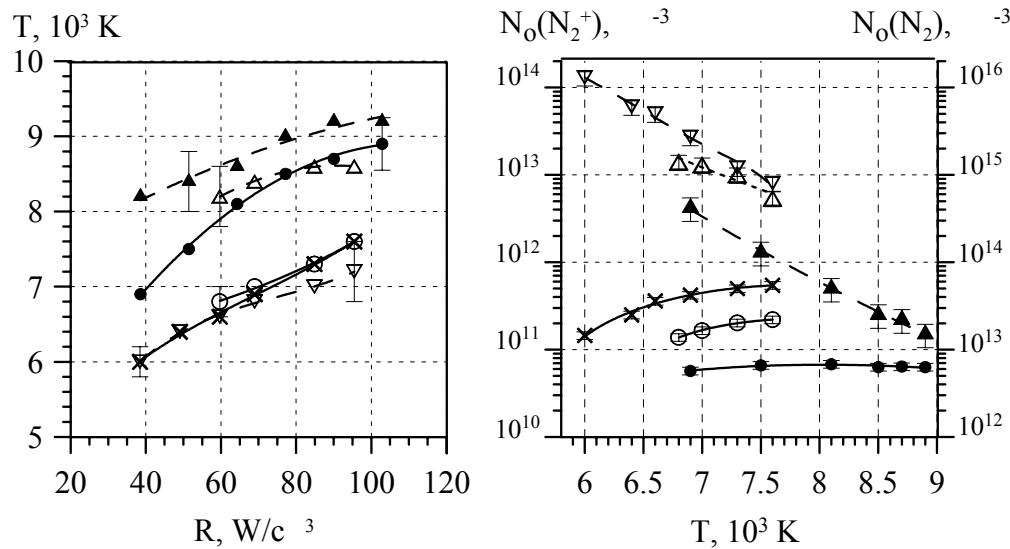


Рис. 14. Н.Г. Быкова, И.С. Першин, Сравнение параметров ...