**Optical diagnostics of atmospheric pressure air plasmas**

**Abstract.**

Atmospheric pressure air plasmas are often thought to be in local thermodynamic equilibrium owing to fast interspecies collisional exchange at high pressure. This assumption cannot be relied upon, particularly with respect to optical diagnostics. Velocity gradients in flowing plasmas and/or elevated electron temperatures created by electrical discharges can result in large departures from chemical and thermal equilibrium. This paper reviews diagnostic techniques based on optical emission spectroscopy and cavity ring-down spectroscopy that we have found useful for making temperature and concentration measurements in atmospheric pressure plasmas under conditions ranging from thermal and chemical equilibrium to thermochemical nonequilibrium.

**Introduction.**

The techniques described in this paper were applied to measurements in three types of air or nitrogen plasmas. The first case [1] corresponds to an air plasma produced by a 50kW inductively coupled plasma torch, flowing at a relatively low velocity (10ms−1). In this case, the plasma is close to local thermodynamic equilibrium (LTE) because the convection rates are lower than those of chemical reactions, and because the measurements are made in the field-free region downstream of the induction coil of the plasma torch. The second case [2] corresponds to a recombining air or nitrogen plasma flowing at high velocity (∼1kms−1) through a water-cooled test section. At this velocity, the convective rates are faster than the rates of chemical reactions and the plasma reaches chemical nonequilibrium at the test-section exit. No electric field is applied in these experiments. Therefore, the temperatures of free-electrons and heavy species remain equilibrated and the flow is close to thermal equilibrium. The third case corresponds to glow discharges generated by a DC electric field in atmospheric pressure air [3]. A characteristic of glow discharges is that the electron temperature Te is elevated with respect to the temperature Tg of heavy species. Representative conditions are Tg = 2000K and Te = 1eV (11600K). Under these conditions, energetic electrons can cause a significant degree of dissociation and ionization. These plasmas are therefore in thermal and chemical nonequilibrium.

In all three cases, it can be assumed that the rotational temperature is close to the gas temperature because rotational relaxation is fast at atmospheric pressure. On the other hand, no simple assumption holds regarding the vibrational and electronic population distributions. The often-used assumption that Telectronic and Tvibrational are approximately equal to the electron temperature is not always valid in nonequilibrium plasmas. In fact, we have shown [4] that this assumption is incorrect in nitrogen glow discharges at atmospheric pressure. Thus, great care must be exercised in interpreting optical diagnostics in nonequilibrium flows.

Section 2 of this paper presents an overview of our experimental plasma generation and optical diagnostic facilities. Section 3 describes the spectroscopic model employed in our data analyses. Section 4 illustrates three methods for measuring the rotational temperature in air and nitrogen plasmas.

**Оптическая диагностика плазмы воздуха атмосферного давления**

Часто считается, что воздушная плазма атмосферного давления находится в локальном термодинамическом равновесии вследствие быстрого межвидового коллизионного обмена при высоком давлении. На это предположение нельзя полагаться, особенно в отношении оптической диагностики. Градиенты скоростей в текучей плазме и/или повышенные температуры электронов, создаваемые электрическими разрядами, могут приводить к значительным отклонениям от химического и теплового равновесия. В данной работе рассматриваются диагностические методы, основанные на оптической эмиссионной спектроскопии и кавитационной кольцевой спектроскопии, которые мы нашли полезными для проведения измерений температуры и концентрации в плазме атмосферного давления в условиях от термического и химического равновесия до термохимической неравновесности.

**Введение.**

Методы, описанные в этой статье, были применены для измерений в трех типах воздушной или азотной плазмы. Первый случай соответствует воздушной плазме, создаваемой индуктивно связанной плазменной горелкой мощностью 50 кВт, протекающей с относительно низкой скоростью (10 м/с). В этом случае плазма близка к локальному термодинамическому равновесию (LTE), поскольку скорости конвекции ниже, чем у химических реакций, и поскольку измерения производятся в свободной от поля области ниже индукционной катушки плазмотрона. Второй случай соответствует рекомбинирующей воздушной или азотной плазме, протекающей с высокой скоростью (≈1 км/с) через испытательную секцию с водяным охлаждением. При этой скорости скорость конвекции выше скорости химических реакций, и плазма достигает химической неравновесности на выходе из испытательного участка. В этих экспериментах не применяется электрическое поле. Поэтому температуры свободных электронов и тяжелых частиц остаются уравновешенными, а поток близок к тепловому равновесию. Третий случай соответствует тлеющим разрядам, генерируемым электрическим полем постоянного тока в воздухе атмосферного давления. Характерной особенностью тлеющих разрядов является то, что электронная температура Te повышена по отношению к температуре Tг тяжелых частиц. Характерными условиями являются Tг = 2000K и Te = 1eV (11600K). В этих условиях электроны с энергией могут вызывать значительную степень диссоциации и ионизации. Таким образом, эти плазмы находятся в термическом и химическом неравновесии.

Во всех трех случаях можно предположить, что вращательная температура близка к температуре газа, поскольку вращательная релаксация происходит быстро при атмосферном давлении. С другой стороны, не существует простого предположения относительно вибрационных и электронных распределений населения. Часто используемое предположение о том, что электронная и колебательная температуры приблизительно равны электронной температуре, не всегда справедливо в неравновесной плазме. Фактически, мы показали, что это предположение неверно в тлеющих разрядах азота при атмосферном давлении. Таким образом, при интерпретации оптической диагностики в неравновесных потоках необходимо проявлять большую осторожность.

В разделе 2 настоящей статьи представлен обзор наших экспериментальных установок для генерации плазмы и оптической диагностики. Раздел 3 описывает спектроскопическую модель, используемую в нашем анализе данных. В разделе 4 показаны три метода измерения вращательной температуры в плазме воздуха и азота.