

04;08

## **Скорость звука и эффект деструкции слабой ударной волны в положительном столбе поперечного тлеющего разряда**

© А.С. Барышников, И.В. Басаргин, М.В. Чистякова

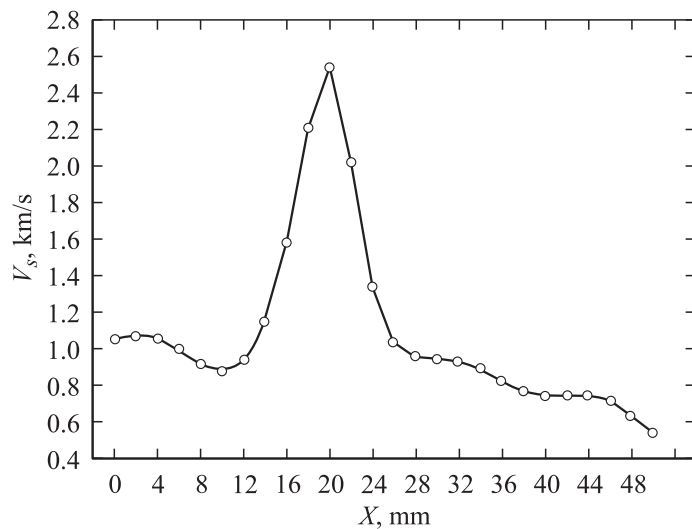
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург  
E-mail: al.bar@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 24 июня 2005 г.

Проведены измерения и расчет скорости звука поперек положительного столба тлеющего разряда в воздухе. Отмечено совпадение положения резкого локального увеличения скорости как в эксперименте, так и в расчетах.

При исследовании устойчивости и деструкции ударной волны в воздушной плазме тлеющего разряда следует правильно классифицировать наблюдаемые эффекты. Для сильной ударной волны электрическая плазма представляет собой энергетическую среду с высокой степенью возбуждения внутренних степеней. Возникающая ситуация аналогична процессам, имеющим место при экзотермических реакциях, таких как взрыв или горение, неустойчивость которых решена в рамках классической теории неустойчивости ударной волны [1]. Однако подробный анализ неустойчивости в плазме показывает, что в воздушной плазме неустойчивость ограничена средними числами Маха (примерно от 3 до 5) и возникает только при некотором ограничивающем условии на предэкспоненту константы равновесия (формулы Саха). Для слабой ударной волны ситуация кардинально другая и, как показывает анализ, вышеупомянутый механизм невозможен. Таким образом, деструкцию слабой ударной волны можно объяснить только в рамках релаксации возбужденных компонент плазмы [2].

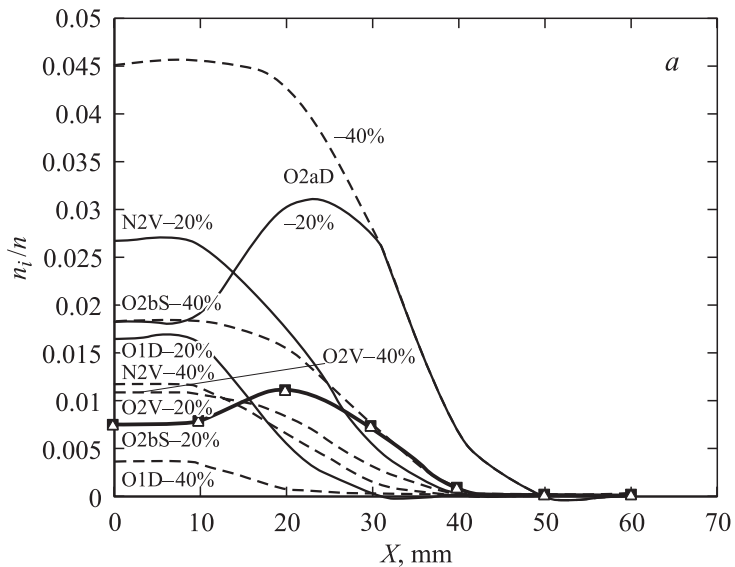
Эксперименты, проведенные авторами на установке, описанной в [3], по измерению предельно низких скоростей ударной волны (скорости звука в плазме), при которых ударная волна еще сохраняется, показывают, что существуют резкие локальные увеличения скорости поперек столба разряда (рис. 1). От ответа на вопрос, связано такое поведение с наличием заряженной компоненты или это поведение определено



**Рис. 1.** Результаты измерения скорости звука  $V_s$  поперек положительного столба тлеющего разряда в воздухе.

только закономерностями дисперсии скорости звука в реагирующих смесях, зависит возможность использования изучаемого эффекта и вне плазмы, на образование которой уходит много энергии.

Расчет величины скорости звука является не простой задачей даже для однотемпературной смеси реагирующих газов. В низкотемпературной плазме физико-химические процессы определяются не только температурой атомов, но и температурой легких частиц — электронов. Для равновесной смеси химически реагирующих компонент можно предложить метод перехода к системе интенсивных термодинамических параметров, предложенный в [4,5]. В этом методе скорость звука рассматривается как корень квадратный из коэффициента в волновом уравнении для плотности тяжелой компоненты. Метод может быть использован при исследовании течений газовых смесей с различными физико-химическими процессами. Для определения влияния отдельных компонент расчеты скорости звука можно проводить для газовых смесей, последовательно добавляя ту или иную компоненту. Это не только



**Рис. 2.** Расчет распределения концентраций возбужденных компонент (а) и распределения скорости звука (b) поперек положительного столба тлеющего разряда. O2aD–O<sub>2</sub>(a<sub>1</sub>Δ), O2aD–O<sub>2</sub>(b<sub>1</sub>Σ), O1D–O(b<sub>1</sub>Σ), N2V, O2V — концентрации компонент со средней энергией колебательного возбуждения. Штриховые линии — снижение  $T_e$  на 40%, сплошные — на 20%.

упрощает расчет, но и дает основание считать, что получаемые значения равновесной скорости звука, хотя и дискретно, но с небольшими скачками, аппроксимируют зависимость неравновесной скорости звука от концентрации реагирующих компонент. Вследствие непрерывности результатов можно считать, что добавление какой-либо компоненты в каждый момент не должно приводить к значительному изменению скорости звука. В то же время процесс установления равновесия можно представить как дискретный ряд процессов установления равновесия по тем или иным компонентам, например через образование переходных комплексов. Эта идеология применима, как нам представляется, и к установлению температурного равновесия между легкой и тяжелой компонентами смеси.

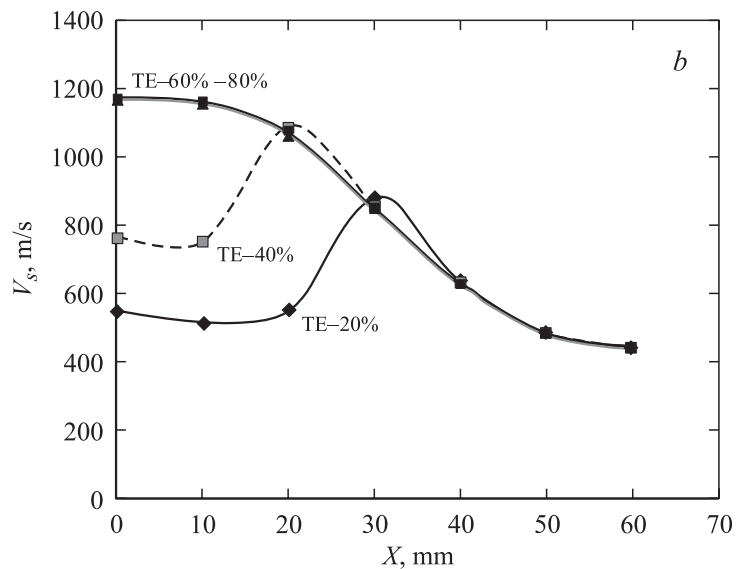


Рис. 2 (продолжение).

Неравновесность низкотемпературной плазмы по температуре создает проблему учета двухтемпературности среды. В плазме энергия тяжелых частиц слишком мала для эффективного возбуждения, диссоциации и ионизации. Можно считать, что физико-химические процессы за счет кулоновского взаимодействия на малых углах рассеяния [6,7] определяются температурой электронов (энергия которых высока и поддерживается электрическим полем). Точнее, температурой  $T_e^{eff}$ , которая на 10–20% ниже температуры электронов, поскольку часть частиц возбуждается столкновениями с тяжелыми частицами. Это снижение электронной температуры на рисунках (рис. 2) указано в процентах со знаком минус.

Расчеты концентраций компонент и скорости звука проводились с помощью методики [4,5] с использованием статистических сумм, которые учитывают трансляционные, вращательные степени свободы, возбуждение колебательных и электронных степеней свободы, диссоциацию и ионизацию компонент (распределения температуры

электронов и атомов брались из эксперимента [8,9]). Температура, определяющая указанные процессы, бралась как средневзвешенное значение:  $T^{eff} = \alpha T_e^{eff} + (1 - \alpha)T_a$ , где значение  $\alpha$  уменьшалось от центра разряда к его периферии в зависимости от отношения полного сечения к трансляционному по линейному закону так, что в центре температура равна  $T_e^{eff}$ , а на периферии  $T_a$ .

В эксперименте на расстоянии примерно 20 mm от центра разряда имеет место локальное увеличение скорости звука (рис. 1). В расчетах при снижении температуры электронов на 20% наблюдается локальное увеличение относительных концентраций возбужденных компонент на расстоянии примерно 20 mm от центра (рис. 2, *a*). Одновременно при снижении температуры электронов на 20–40% наблюдается локальное увеличение скорости звука поперек положительного столба на расстоянии 20–30 mm от центра (рис. 2, *b*). В расчетах заметно и малое увеличение в центре столба, которое также отмечается в эксперименте.

## Список литературы

- [1] Зельдович Я.Б., Баренблат Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.И. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980. 144 с.
- [2] Барышников А.С., Басаргин И.В., Чистякова М.В. // ЖТФ. 2001. Т. 71. В. 3. С. 17–21.
- [3] *Varyshnikov A.S., Basargin I.V., Chistyakova M.V.* Sound Velocity in Discharge Air Plasma and the Problem of Shock Wave Instability. In: Proc. Conf. The Physics of Compressible Turbulent Mixing. P. 461. St. Petersburg, July 5–9, 1999.
- [4] Рыдалевская М.А. Статистические и кинетические модели в физико-химической газодинамике. СПб.: СПб. университет, 2003.
- [5] Рыдалевская М.А. // Аэродинамика: Сб. / Под ред. П.Н. Мирошина. СПб.: СПб. университет, 2000. С. 83.
- [6] Полак Л.С. Неравновесная химическая кинетика и ее применение. М.: Наука, 1979. 248 с.
- [7] Ферцигер Дж., Капер Г. Математическая теория процессов переноса в газах. М.: Мир, 1976. 554 с.
- [8] Басаргин И.В., Васильев А.П. Зондовые измерения в свободном тлеющем разряде в воздухе при средних давлениях. Препринт ФТИ, № 1643. С.-Петербург, 1995. 25 с.
- [9] Басаргин И.В., Мишин Г.И. Распространение ударных волн в плазме поперечно и продольно ориентированного тлеющего разряда. Препринт ФТИ, № 860. Л., 1984. 22 с.