

УДК 537.523:538.4

А.А. ТРОПИНА*Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Украина***ВЛИЯНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ НА ИОНИЗАЦИОННОЕ РАВНОВЕСИЕ В ПЛАЗМЕ ВОЗДУХА**

Проведен теоретический анализ влияния уровня пульсаций температуры электронов на ионизационное равновесие в плазме воздуха при атмосферном давлении. С учетом данных численных расчетов равновесного состава плазмы показано, что повышение уровня пульсаций при определенных значениях температуры и давления может интенсифицировать рекомбинационные и ионизационные процессы с возможным переключением форм поддержания неравновесного разряда.

неравновесная плазма, турбулентные пульсации, температура электронов, ионизационное равновесие, рекомбинационный режим

Введение

Взаимодействие турбулентного газового потока с термодинамически равновесной плазмой, как с системой с нелинейным джоулевым тепловыделением, приводит к появлению различного рода эффектов. Подробный анализ влияния турбулентности на электрические и тепловые характеристики дуги применительно к плазме одноатомных газов приведен в монографии [1], для плазмы молекулярных газов – в работах [2], [3].

В то же время значительный научный и практический интерес представляет изучение влияния турбулентности на неравновесную низкотемпературную плазму. Это связано с широкими возможностями использования такой плазмы в качестве альтернативного источника зажигания или для стабилизации процессов горения, особенно в высокоскоростных течениях, характерных для различных аэрокосмических приложений. Полученные предварительные результаты с использованием простейших градиентных моделей показали, что, турбулентность может приводить к снижению эффективной проводимости, росту напряженности электрического тока, усилению ионизационной и термической неравновесности плазмы. При этом усиление термической и

ионизационной неравновесности, как правило, обусловлено появлением значительных градиентов усредненных величин: температуры, скорости, напряженности поля и т.д., что имеет место в узких приэлектродных слоях.

Однако турбулентные пульсации параметров плазмы могут создать дополнительный механизм нарушения ионизационного равновесия, даже при отсутствии этих градиентов, когда плазма в исходном состоянии равновесна. Появление такого механизма может приводить к появлению новых эффектов, анализ которых применительно к плазме одноатомных газов приведен в работах [4], [5]. В то же время работ по изучению влияния турбулентности на неравновесность плазмы молекулярных газов, несмотря на большой практический интерес к таким системам, в литературе нет. В первую очередь, это связано со сложным механизмом передачи энергии электромагнитного поля молекулярному газу, большая часть которой передается через возбуждение колебательных уровней молекул.

В последнее время в литературе появились данные по кинетике реакций рекомбинации, ионизации и возбуждения колебательных уровней молекул для плазмы воздуха [6], что позволяет провести анализ влияния турбулентности на нарушение ионизацион-

ного равновесия в плазме. В данной работе проводится теоретический анализ такого влияния для плазмы воздуха при атмосферном давлении.

Постановка задачи. Рассмотрим модель плазмы, состоящей из электронов, положительных и отрицательных ионов и молекул в основном и возбужденном состояниях. Исходные уравнения математической модели такой плазмы в гидродинамическом приближении, помимо уравнений Навье-Стокса и уравнений модели турбулентности, включают в себя следующую систему уравнений для компонент плазмы:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{I}_e = v_i n_e - v_{at} n_e - \alpha_{ei} n_e n_+ + \alpha^* n_- n^*, \quad (1)$$

$$\frac{\partial n_-}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{I}_- = v_{at} n_e - \alpha_{ii} n_- n_+ - \alpha^* n^* n_-, \quad (2)$$

$$\frac{\partial n^*}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{I}^* = v_{ex} n_e - \alpha^* n_- n^*, \quad (3)$$

$$\bar{I}_e = b_e n_e \bar{E} + n_e \bar{v} - D_e \nabla n_e,$$

$$\bar{I}_- = b_- n_- \bar{E} + n_- \bar{v} - D_- \nabla n_-,$$

$$\bar{I}^* = n^* \bar{v} - D^* \nabla n^*, \quad v_a = v_a^2 + v_a^3,$$

где n_e, n_+, n_-, n^* – концентрация электронов, положительных, отрицательных ионов и электронно-возбужденных частиц;

$\bar{I}_-, \bar{I}_e, \bar{I}^*$ – потоки отрицательных ионов, электронов и возбужденных молекул;

v_i, v_{at} – частота ионизации электронным ударом и частота прилипания;

v_a^2 – частота диссоциативного прилипания;

v_a^3 – частота трехчастичного прилипания;

$\alpha_{ei}, \alpha_{ii}, v_{ex}$ – константы электрон-ионной и ион-ионной рекомбинации и возбуждения электронных уровней молекул.

При проведении стандартной процедуры осреднения для получения уравнений турбулентного течения примем следующие упрощающие предположения:

1) учитываются флуктуации параметров только электронной компоненты, для которой тяжелые частицы являются неподвижным фоном. При этом $n^* = n' = 0$, $n'_e + n'_- = n'_+$ в силу квазиэлектронейтральности плазмы;

2) флуктуации частоты соударений электронов с тяжелыми частицами не учитываются вследствие того, что характерные частоты турбулентности намного меньше частот соударений электронов с атомами и ионами.

Не останавливаясь на достаточно громоздком виде полученных уравнений, проанализируем поведение источников члена $\tilde{R}_e$, определяющего процессы рождения и гибели электронов в уравнении (1).

После процедуры осреднения $\tilde{R}_e$ принимает вид:

$$\begin{aligned} \tilde{R}_e = & \tilde{v}_i \tilde{n}_e + \beta_e \overline{T'_e n'_e} - \tilde{v}_a \tilde{n}_e - \beta_a \overline{T'_e n'_e} - \\ & - \alpha_{ei} \tilde{n}_e \tilde{n}_+ - \beta_{ei} \tilde{n}_+ \overline{T'_e n'_e} - \beta_{ei} \tilde{n}_e \overline{T'_e n'_+} - \\ & - \alpha_{ei} \overline{n'_e n'_+} - \beta_{ei} \overline{T'_e n'_e n'_+} + \alpha^* \tilde{n}^* \tilde{n}_-, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\beta_a = \frac{dv_a}{dT_e}$; $\beta_e = \frac{dv_i}{dT_e}$; $\beta_{ei} = \frac{d\alpha_{ei}}{dT_e}$;

$\tilde{y}, y'$ – средние и пульсационные значения соответствующей величины.

В выражении (4) появляются следующие моменты второго $\overline{T'_e n'_e}$, $\overline{T'_e n'_+}$, $\overline{n'_e n'_+}$ и третьего порядка $\overline{T'_e n'_e n'_+}$, которые необходимо замыкать с учетом данных о структуре турбулентности в плазме. Согласно [7], турбулентные пульсации электронного компонента имеют локально-изотропную структуру (за исключением приэлектродных слоев), что позволяет пренебречь нечетными моментами в уравнении (4). Кроме того, пульсации n'_e, n'_+, T'_e могут быть заменены своими среднеквадратичными отклонениями n_e^0, n_+^0, T_e^0 .

Тогда выражение для $\tilde{R}_e$ принимает вид:

$$\begin{aligned} \tilde{R}_e = & (\tilde{v}_i - \tilde{v}_a) \tilde{n}_e + (\beta_e - \beta_a) T_e^0 n_e^0 - \\ & - \alpha_{ei} \tilde{n}_e \tilde{n}_+ - \beta_{ei} \tilde{n}_+ T_e^0 n_e^0 - \beta_{ei} \tilde{n}_e T_e^0 n_+^0 - \\ & - \alpha_{ei} n_e^0 n_+^0 + \alpha * \tilde{n} * \tilde{n}_-. \end{aligned} \quad (5)$$

Коэффициенты v_i, v_a, α_{ei} для плазмы воздуха определялись следующими выражениями [5]:

$$\begin{aligned} v_i = & A_1 T_e^{9/2} (0,0018 + T_e^{-11}) \exp\left(-\frac{B_1}{T_e^2}\right), \\ v_a^2 = & A_2 \exp\left(-\frac{B_2}{T_e^{3/2} (1 + 10,1 T_e^{-5,5} \exp\left(-\frac{2,53}{T_e^2}\right))}\right), \\ v_a^3 = & A_3 \left(0,08 + T_e^{3/4} (1 + 16,23 \exp\left(-\frac{B_3}{T_e^2}\right))\right)^{-1/2}, \\ \alpha_{ei} = & A_4 \left(\frac{300}{T_e}\right)^{1/2}, \end{aligned}$$

где $A_1 = 8,975 \cdot 10^9 \delta$; $A_2 = 3,06 \cdot 10^8 \delta$; $A_4 = 3 \cdot 10^{-7}$;

$A_3 = 3,075 \cdot 10^7 \delta^2$; $B_1 = 10,13$; $B_2 = 3,039$;

$B_3 = 0,734$.

Равновесный состав плазмы воздуха при атмосферном давлении рассчитывался с помощью численной методики, основанной на минимизации энергии Гиббса системы $G = \sum_{i=1}^n n_i \mu_i$ (μ_i – стандартный химический потенциал) при постоянных температуре, давлении и элементном составе при условии не отрицательности равновесных чисел молей n_i . Использована модель идеального ассоциированного газа, когда химический потенциал компонентов плазмы описывается как

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln(p_i / p^0),$$

где μ_i^0 – стандартный химический потенциал (молярная стандартная энергия Гиббса идеализированного состояния газа при стандартном давлении);

p^0 – атмосферное давление;

p_i – парциальное давление.

Кроме того, дополнительно использовалось условие квазиэлектронейтральности системы.

Все расчеты проведены в рамках так называемого стехиометрического алгоритма, когда выбирается максимальное количество линейно-независимых реакций и минимизация энергии Гиббса проводится относительно химических переменных, связанных с химическими реакциями. При этом необходимые химические реакции и начальное приближение для равновесных чисел молей генерируются автоматически [8]. При этом предполагался следующий состав плазмы: нейтральные компоненты $O, O_2, N, N_2, NO, NO_2, O_3$, положительные ионы $O^+, O_2^+, N^+, NO^+, NO_2^+$, электроны и отрицательные ионы O^-, O_2^-, NO_2^- . Все необходимые для расчета данные, из которых были рассчитаны молярные энергии Гиббса, приведены в справочнике [9].

Результаты расчетов

Результаты расчета равновесного состава плазмы воздуха при атмосферном давлении и диапазоне температур $4000 \leq T \leq 6000$ приведены для заряженных компонент на рис. 1, 2, на рис. 3 – для нейтральных компонент.

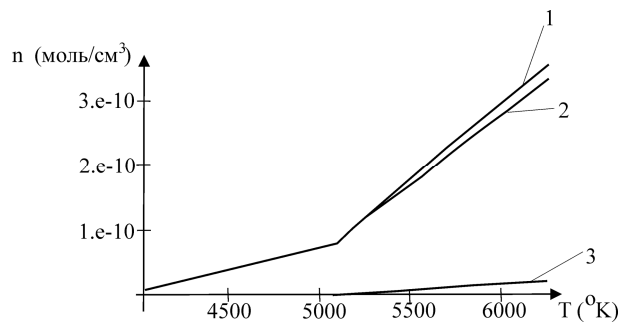


Рис. 1. Равновесные концентрации заряженных компонент воздуха при атмосферном давлении: 1 – электронов; 2 – ионов NO^+ ; 3 – ионов O^+

Анализ полученных зависимостей позволяет утверждать, что основным положительным ионом в равновесной плазме воздуха является ион NO^+ , а

концентрация отрицательных ионов (в основном ионов O^- на три порядка ниже равновесной концентрации электронов.

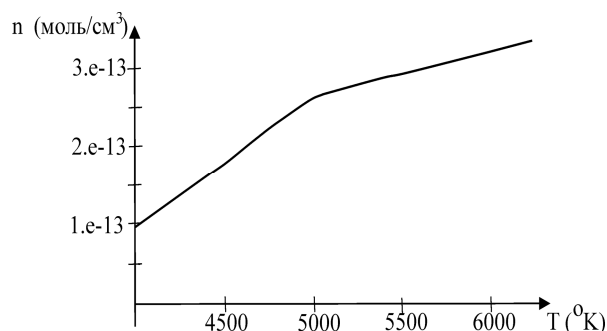


Рис. 2. Равновесные концентрации отрицательных ионов O^- при атмосферном давлении

Для оценки влияния уровня пульсаций температуры электронов на поведение $\tilde{R}_e$ и его отклонение от равновесных значений уровень пульсаций T_e варьировался в пределах от 1% до 8%. При таких относительно малых значениях $T_e^0/\tilde{T}_e$, пользуясь уравнением Саха [10], можно найти связь между уровнем пульсаций концентрации электронов и уровнем пульсаций электронной температуры.

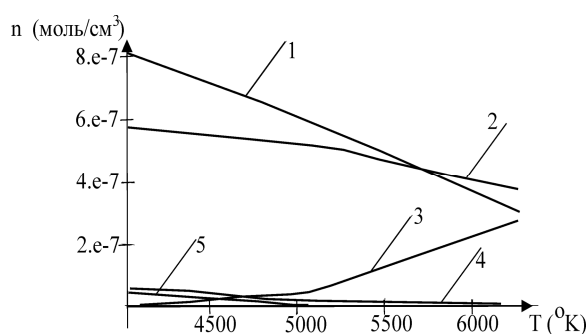


Рис. 3. Равновесные концентрации нейтральных компонент воздуха при атмосферном давлении: 1 – N_2 , 2 – O , 3 – NO , 4 – O_2 , 5 – N

Согласно [10] температура электронов в неравновесном разряде должна превышать по порядку величины одну десятую от потенциала ионизации, ибо в противном случае резко снижается и скорость ионизации и концентрация электронов. Анализ зависимости источникового члена $\tilde{R}_e$ при типичных

для неравновесного разряда температурах электронов порядка 1 – 3 эВ показал, что в зависимости от значения T_e возможно существование трех режимов поддержания разряда. Так, при $T_e \cong 1$ эВ реализуется так называемый рекомбинационный режим (скорость гибели электронов определяется диссоциативной рекомбинацией), при этом увеличение интенсивности пульсаций электронной компоненты приводит к интенсификации рекомбинационного процесса (рис. 4).

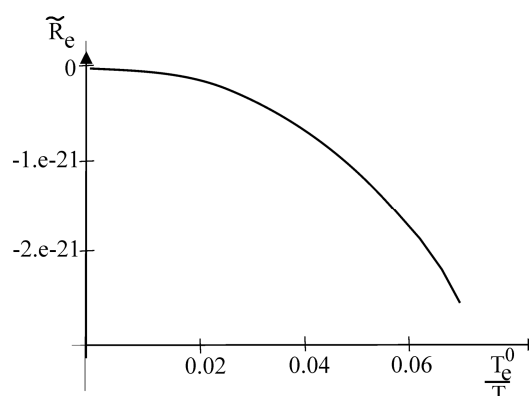


Рис. 4. Зависимость $\tilde{R}_e$ от уровня пульсаций электронной температуры при $\tilde{T}_e = 1$ эВ

При $T_e > 2$ эВ разряд переходит в ионизационный режим, и пульсационные процессы интенсифицируют процессы ионизации прямым электронным ударом (рис. 5). В то же время при $T_e \cong 1,9$ эВ был обнаружен кризисный характер поведения разряда (рис. 6).

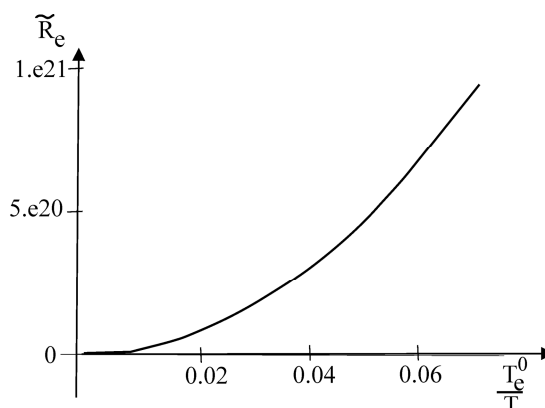


Рис. 5. Зависимость $\tilde{R}_e$ от уровня пульсаций электронной температуры при $\tilde{T}_e = 2$ эВ

Так, при уровне пульсаций температуры электронов $T_e^0 / \tilde{T}_e < 5\%$ наблюдается ионизационный режим, а при $T_e^0 / \tilde{T}_e = 5\%$ происходит скачкообразный переход к рекомбинационному режиму.

Таким образом, наличие турбулентных пульсаций электронной компоненты может приводить к изменению типа разряда, переходу его в новое состояние (например, котрагированное). Полученные результаты могут в первом приближении объяснить трудности стационарного поддержания неравновесного разряда в воздухе при атмосферном давлении, когда турбулентные флуктуации температуры электронов могут приводить к обеднению зоны разряда электронами и к его погасанию или к переходу к искровой форме разряда.

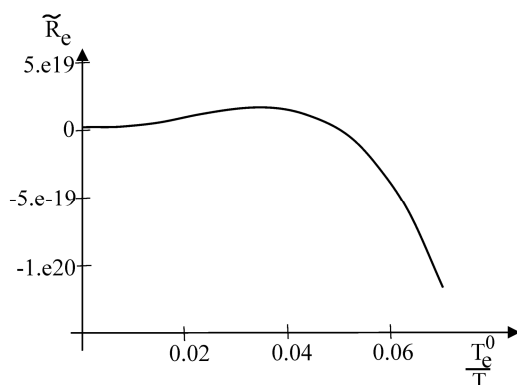


Рис. 6. Зависимость $\tilde{R}_e$ от уровня пульсаций электронной температуры при $\tilde{T}_e = 1,9$ эВ

Выводы

1. Проведен анализ влияния уровня пульсаций температуры электронов T_e на нарушение ионизационного равновесия в плазме воздуха при атмосферном давлении.

2. Показано, что наличие турбулентных пульсаций в зависимости от значения T_e способствует интенсификации процессов ионизации, рекомбинации или переводит разряд в новое состояние.

Работа проведена в рамках гранта МОН Украины 0107U001007 “Разработка теории управления процессами горения с помощью электрического поля”.

Литература

1. Теория столба электрической дуги. Низкотемпературная плазма. Т.1. – Новосибирск: Наука, 1990. – 376 с.
2. Klement'eva I., Bocharov A., Bityurin V. MHD assisted mixing through the experimental and numerical study // Proc. of the 28th ICPIG, 18-22 July. – 2005, Eindhoven, the Netherlands. – P. 5-8.
3. Matveev I., Serbin S.I., Tropina A.A., Kostyik V.Y. Numerical modeling of arc characteristics in a turbulent gas flow // Proc. of 2-nd International workshop and exhibition of plasma assisted combustion (2-nd IWEPAC), 19-20 Sept. 2006, Washington, USA. – P. 38-39.
4. Aithal S.M., Subramamiam V.V. Numerical model of a transferred plasma arc // Journal of Applied Physics. – 1998. – №7, v.84. – P. 3506-3517.
5. Лелевкин В.М., Семенов В.Ф. Численный анализ характеристик дуги в ламинарном и турбулентном потоке газа // Теплофизика высоких температур. – 2003. – Т.41, №6. – С. 839-847.
6. Ивановский А.В. О механизме распространения положительного лидера // Журнал технической физики. – 2000. – Т.70, вып. 6. – С. 43-51.
7. Левитан Ю.С. Расчетно-теоретическое исследование электрической дуги постоянного тока в турбулентном потоке // Изв. СО АН СССР. Сер техн. наук. – 1984. – №10, вып.2. – С. 117-137.
8. Smith W.R., Missen R.W. Chemical reaction. Equilibrium analysis. Theory and algorithms. N.Y. John Wiley & Sons, 1982. – 364 p.
9. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочник / Под ред. В.Г. Глушко. – М.: Наука, 1978-1983.
10. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 592 с.

Поступила в редакцию 12.02.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Г. Солодов, Национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков.