

04

Расчет состава плазмы дугового импульсного разряда в мультикамерном разряднике

© В.Я. Фролов¹, Д.В. Иванов¹, Ю.В. Мурашов¹, А.Д. Сиваев²

¹ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

² НПО „Стример“, Санкт-Петербург

E-mail: eie@spbstu.ru

Поступило в Редакцию 30 октября 2014 г.

Проведен расчет состава плазмы дугового импульсного разряда в мультикамерном разряднике. Обоснован выбор химических компонентов, учитываемых при расчете. Описана система нелинейных уравнений для расчета состава плазмы. Указаны источники данных для проведения расчетов. Приведены и проанализированы результаты расчетов. Описано дальнейшее использование результатов расчета состава такой плазмы.

В настоящее время новым перспективным способом защиты воздушных линий электропередачи от грозových перенапряжений является применение мультикамерных разрядников [1,2]. Мультикамерный разрядник состоит из большого числа последовательно соединенных камер, в которых при пробое возникает импульсный дуговой разряд. Такой разряд сопровождается эрозией материала электродов и испарением материала разрядной камеры. При этом в камере возникает повышенное давление, приводящее к выбросу плазменной струи из разрядной камеры и гашению электрической дуги (рис. 1).

Для повышения эффективности работы мультикамерных разрядников необходимо провести исследования происходящих в них процессов. Наряду с экспериментальными методами исследования все более широкое распространение получают теоретические исследования путем математического моделирования [3–8]. При этом полученные в ходе экспериментов данные используются в математической модели в качестве исходных данных, а также в целях коррекции модели.

Для разработки математической модели импульсного дугового разряда необходимо знать теплофизические свойства плазмы, такие

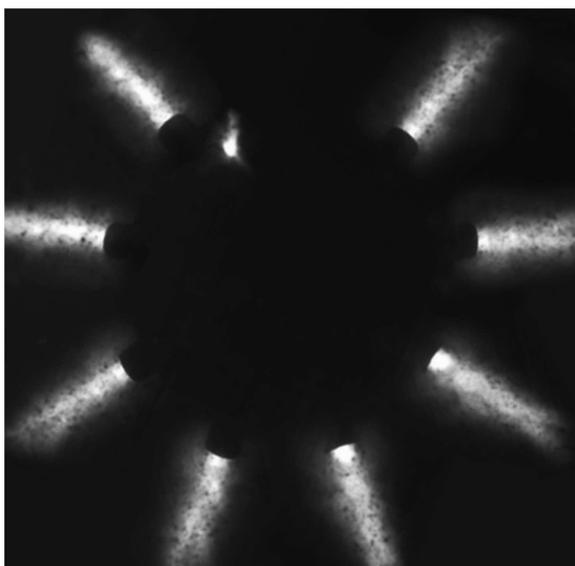
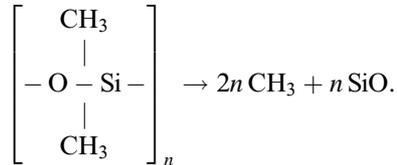


Рис. 1. Импульсный дуговой разряд в мультикамерном разряднике.

как плотность, теплоемкость, электропроводность, в зависимости от температуры и давления, а для расчета этих свойств, в свою очередь, исходным является состав плазмы, т.е. зависимости концентраций компонентов плазмы от температуры (и давления). Расчет состава такой плазмы и является предметом данной статьи.

Расчету состава и теплофизических свойств плазмы в последние 30 лет было посвящено большое количество научной литературы. Однако в большинстве работ рассчитывались состав и свойства газов, используемых в плазменной технике в качестве плазмообразующих — Ar, He, O₂, N₂, H₂ и др., а также их смеси как в условиях равновесной плазмы, так и при использовании двухтемпературной модели [9–11]. Кроме того, рассчитывались состав и свойства газов, применяемых в дугогасящих камерах SF₆, SF₆ + N₂, SF₆ с добавлением пара Cu [12,13]. Ближе всего к тематике данной работы — статьи о составе и свойствах плазмы, образованной парами различных материалов в дугогасящих камерах [14,15].

Первый шаг расчета — необходимо задать компоненты, которые могут существовать в плазме и будут учитываться при расчете состава. В качестве материала электродов в разрядниках обычно используют медь (Cu), вольфрам (W), железо (Fe). В качестве материала разрядной камеры используется силиконовая резина, которая при температуре свыше 300°С деполимеризуется [16]:



Исходя из этой информации, в расчете учитываются следующие компоненты:

— одноатомные (27 компонентов): e, Cu, Cu⁺, Cu²⁺, Cu³⁺, Fe, Fe⁺, Fe²⁺, Fe³⁺, W, W⁺, W²⁺, W³⁺, O, O⁺, O²⁺, O⁻, C, C⁺, C²⁺, C⁻, H, H⁺, H⁻, Si, Si⁺, Si²⁺;

— двухатомные (26 компонентов): Cu₂, Fe₂, O₂, O₂⁺, O₂⁻, C₂, C₂⁺, C₂⁻, CO, CO⁺, H₂, H₂⁺, OH, OH⁺, OH⁻, CH, CH⁺, CuO, CuH, FeO, FeH, WO, Si₂, SiO, SiH, SiC;

— многоатомные (41 компонент): O₃, O₃⁻, C₃, CO₂, CO₂⁺, CO₂⁻, C₂O, H₃⁺, HO₂, HO₂⁻, H₂O, H₂O⁺, H₂O₂, H₃O⁺, CH₂, CH₃, CH₄, C₂H, C₂H₂, C₂H₃, C₂H₄, C₂H₅, C₂H₆, HCO, COOH, H₂CO, HCOOH, CH₃O, CH₂OH, CH₃OH, CuOH, FeO₂, FeOH, WO₂, Si₃, SiO₂, SiH₂, SiH₃, SiH₄, SiC₂, Si₂C.

Так как плазма в мультикамерном разряднике существует при повышенном давлении, то в расчете предполагалось наличие в плазме локального термодинамического равновесия.

Для расчета состава плазмы была сформирована следующая система уравнений [17,18]:

— 86 уравнений, составленных по закону действующих масс, следующего вида:

$$\prod_{i=1}^N \frac{n^{a_{i,j}}}{n_j} = K_j(T, p), \quad (1)$$

где n_i — концентрации элементов (атомов); n_j — концентрация сложных компонентов (молекул); $a_{i,j}$ — матрица стехиометрических коэффициентов реакций разложения сложных веществ на атомы;

$K_j(T, p)$ — константа равновесия соответствующей реакции; N — число химических элементов, образующих систему ($N = 7$);

— 6 уравнений материального баланса вида:

$$\frac{\sum_{i=1}^M a_{g_i} n_i}{\sum_{i=1}^M a_{k_i} n_i} = \frac{G}{K}, \quad (2)$$

где a_{g_i} и a_{k_i} — количество атомов вида g и k соответственно в молекуле i -го вещества, G и K — суммарные количества атомов вида g и k в плазме, M — число рассматриваемых компонент плазмы ($M = 94$);

— уравнение квазинейтральности;

— уравнение закона Дальтона (о сумме парциальных давлений).

Константы реакций для реакций ионизации брались из известной формулы Саха [18].

Информация об энергетических уровнях и их статистических весах для атомов и атомарных ионов, которая нужна для расчета константы реакции по формуле Саха, бралась из электронной базы данных NIST [19].

Снижение потенциала ионизации, обусловленное влиянием заряженных частиц, оценивалось в приближении Дебая–Хюккеля [11]:

$$\Delta E = 2K_{\text{ДН}}(Z + 1), \quad (3)$$

где Z — заряд иона в уравнении Саха, $K_{\text{ДН}} = e^2 / (8\pi\epsilon_0\lambda_{\text{Д}})$, $\lambda_{\text{Д}}$ — радиус Дебая.

Константы остальных реакций были взяты из [11,20]. Сформированная система нелинейных уравнений решалась методом Ньютона для приращений логарифмов неизвестных [17]. Расчеты проводились для медных электродов для давления 2 atm и диапазона температуры 1500–10 000 К при следующих пропорциях, входящих в систему концентраций основных химических элементов:

$$\text{Si} : \text{O} : \text{C} : \text{H} = 1 : 1 : 2 : 6, \quad \text{Cu} : \text{O} = 1 : 10.$$

Результаты расчетов представлены на рис. 2. Показаны только компоненты, концентрации которых в рассматриваемом диапазоне температур превышают 10^{18} m^{-3} .

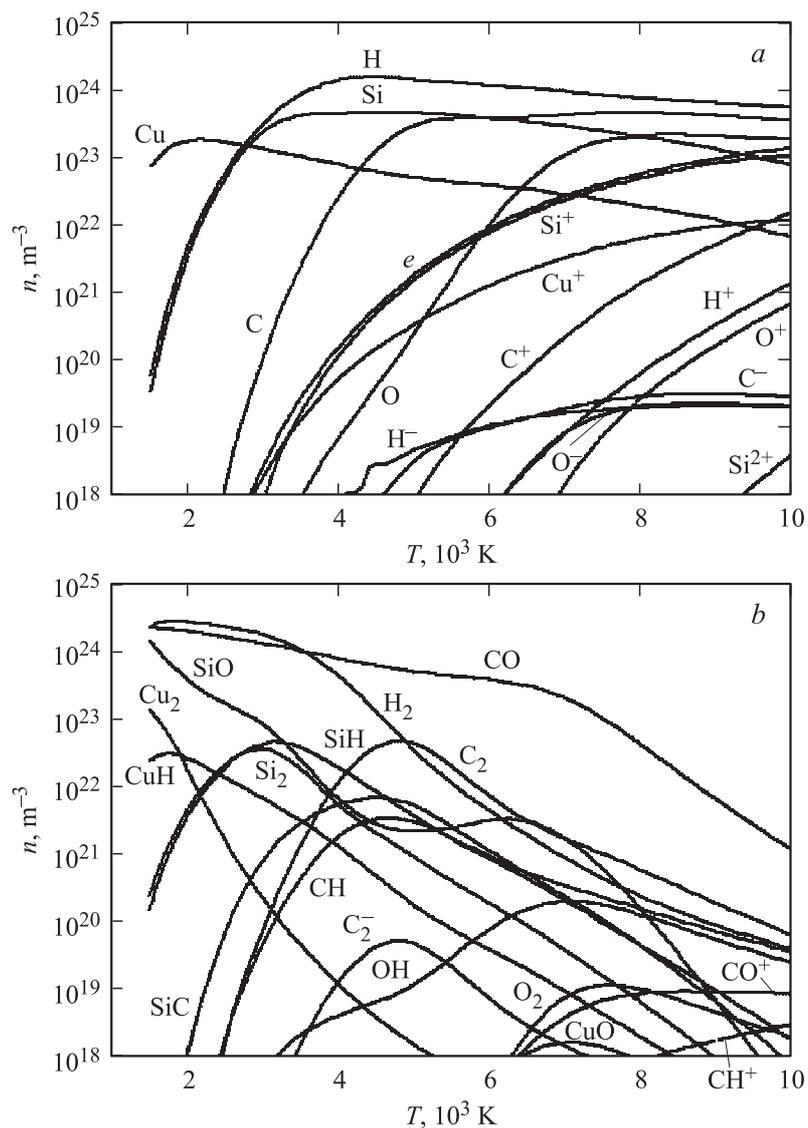


Рис. 2. Состав плазмы дугового импульсного разряда в мультикамерном разряднике при давлении 2 atm: *a* — одноатомные компоненты, *b* — двухатомные компоненты, *c* — многоатомные компоненты.

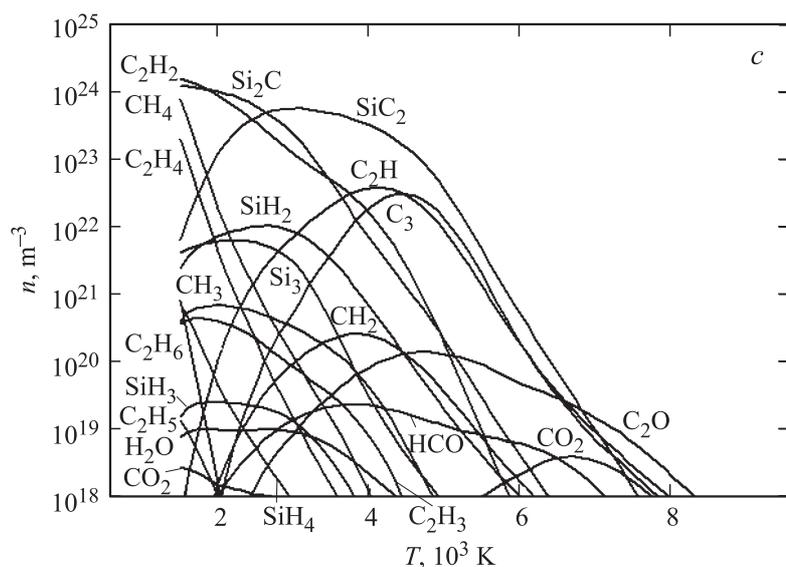


Рис. 2 (продолжение).

Из рис. 2, *a* видно, что появление электронов обусловлено ионизацией атомов с низким потенциалом ионизации — кремния (Si) и меди (Cu). При этом, несмотря на то что потенциал ионизации у кремния несколько выше, чем у меди, концентрация ионов кремния выше, что объясняется большим содержанием кремния в плазме, чем в меди (задано $\text{Si} : \text{Cu} = 10 : 1$). Также видно, что ионизация остальных атомов происходит при большей температуре. Концентрация отрицательных ионов незначительна.

Рис. 2, *b* показывает, что среди двухатомных компонентов в рассматриваемой плазме наибольшей концентрацией обладают молекулярный водород (H_2), а также оксиды кремния и углерода (SiO и CO).

На основании результатов, представленных на рис. 2, *c*, можно сделать вывод, что диссоциация всех многоатомных компонентов происходит при низких температурах, и при температурах больше 6000 K их практически не остается.

Таким образом, в работе была составлена система уравнений, определяющая состав плазмы дугового импульсного разряда в мультикамерном разряднике, написана программа расчета и получены результаты для давления 2 atm и диапазона температур 1500–10 000 К. Полученные результаты будут в дальнейшем использованы для расчета теплофизических свойств такой плазмы и математическом моделировании процессов в мультикамерных разрядниках.

Работы, описанные в статье, выполнены в рамках Программы „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы“ по соглашению № 14.579.21.0041 от 21.08.2014 года.

Список литературы

- [1] Подпоркин Г.В., Енькин Е.Ю., Калакутский Е.С., Пильщиков В.Е., Сиваев А.Д. // Электричество. 2010. № 10. С. 11–16.
- [2] Подпоркин Г.В., Енькин Е.Ю., Пильщиков В.Е. // Электричество. 2013. № 1. С. 26–32.
- [3] Frolov V., Petrov G., Yushin B., Dubov M., Churkin I., Ivanov D. // Proc. 18th Symposium on Physics of Switching Arc / Eds V. Aubrecht and M. Bartlova. 2009. P. 162–165.
- [4] Фролов В.Я., Дубов М.В., Юшин Б.А. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2009. № 2(78). С. 125–129.
- [5] Фролов В.Я. и др. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. № 1(95). С. 255–264.
- [6] Baeva M., Zalach J., Petrov G., Ushin B., Ivanov D., Frolov V., Uhrlandt D. // Proc. XIXth Symposium on Physics of Switching Arc. / Eds V. Aubrecht and M. Bartlova. 2011. P. 105–108.
- [7] Дресвин С.В., Иванов Д.В., Фролов В.Я. // Индукционный нагрев. 2012. В. 4 (22). С. 25–34.
- [8] Фролов В.Я., Иванов Д.В., Шибяев М.А. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 16. С. 1–7.
- [9] Murphy A.B., Arundell C.J. // Plasma Chem. Plasma Process. 1994. V. 14. P. 451–490.
- [10] Rat V., Murphy A.B., Aubreton J., Elchinger M.F., Faushais P. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. V. 41. N 18. P. 183 001.
- [11] Capitelli M., Colonna G., D'Angola A. Fundamental Aspects of Plasma Chemical Physics: Thermodynamics (Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics). 2011.

- [12] *Gleizes A., Razafinimanana M., Vacquie S.* // Plasma Chem. Plasma Proc. 1986. V. 6. P. 65–78.
- [13] *Chervy B., Gleizes A., Razafinimanana M.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1994. V. 27. N 6. P. 1193–1206.
- [14] *André P.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1996. V. 29. P. 1963–1972.
- [15] *André P.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1997. V. 30. P. 475–493.
- [16] Брошюра компании Wacker Silicones:
http://www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/disido_cy/en/media/print/WSL-Schulversuche_A4_E.pdf
- [17] *Суриц А.И.* Термодинамика высокотемпературных процессов. М.: Металлургия, 1985. 568 с.
- [18] *Дресвин С.В., Иванов Д.В.* Физика плазмы. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 542 с.
- [19] NIST Atomic Spectra Database: <http://www.nist.gov/pml/data/asd.cfm>
- [20] Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справ. изд.: В 4 т. / Под ред. В.П. Глушко и др. 3-е изд. М.: Наука, 1978–1982.