

04.1

Транспортные и термодинамические свойства равновесного дугового разряда в смеси воздуха с водородом, аргона с водородом

© Н.В. Образцов, Ю.В. Мурашов, Н.К. Куракина, Р.И. Жилигатов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: obraztsovnikita@yandex.ru

Поступило в Редакцию 22 ноября 2023 г.

В окончательной редакции 29 января 2024 г.

Принято к публикации 29 января 2024 г.

Выполнен расчет транспортных и термодинамических свойств равновесного дугового разряда в смесях воздуха и водорода, а также аргона и водорода в интервале температур от 300 до 25 000 К. Представлена методика расчета, применяемая для определения электропроводности, теплопроводности, вязкости, теплоемкости и плотности. Приведены и проанализированы результаты расчетов с учетом применения в плазменных технологиях.

Ключевые слова: транспортные свойства, термодинамические свойства, равновесный дуговой разряд, плазмотрон.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.09.57564.19811

Исследование применения низкотемпературной плазмы необходимо для многих направлений техники и промышленности: плазмотермическое нанесение покрытий, плазменная резка, диагностика химического состава, плазменная сварка, разработка новых типов коммутационных устройств и т.д. [1–3]. В зависимости от области применения используют различные плазмообразующие смеси. Например, в плазменной сварке или резке применяют плазмообразующие смеси газов Ar, H₂ или He: Ar/H₂, Ar/He, Ar/H₂/He. В качестве дугогасительной среды в газонаполненных выключателях используют SF₆, CO₂ или воздух, смешанный с материалами абляции сопел и эрозии электродов (контактов): C₂F₄, Cu, W, Ag, Al [4]. Таким образом, определение свойств газовых смесей является одной из ключевых задач при проектировании и модернизации существующих устройств, в которых присутствует равновесный газовый разряд.

Одним из направлений плазменных технологий является плазменное напыление, которое в настоящее время получило дополнительный импульс в развитии из-за возможности применения в аддитивных технологиях [5]. Традиционно в технологии плазмотермического нанесения покрытий используются аргон и воздух, однако для повышения энтальпии плазменного потока могут быть использованы плазмообразующие смеси аргона с водородом (или с гелием) или воздуха с водородом. В плазменный поток подают различные порошки (Al₂O₃, MgO, TiO₂, Cr₂O₃, ZrO₂ и т.п.), которые расплавляются в плазменной струе и затем наносятся на поверхность. Оптимизация такого технологического процесса требует проведения экспериментов и численного моделирования. Поскольку температура ядра дуги превышает 12 000 К, скорость потока составляет сотни м/с. Численное моделирование может стать вспомогательным инструментом исследователя для принятия обоснованных решений в

реальных прикладных задачах плазменного напыления. Цель настоящей работы — установить транспортные и термодинамические свойства равновесного дугового разряда в смеси воздуха с водородом, аргона с водородом.

Для развития технологического процесса и с целью снижения затрат на экспериментальные исследования используется компьютерный инжиниринг (computer-aided engineering, CAE). CAE является одной из центральных и самых наукоемких технологий современной промышленности, обеспечивающих конкурентоспособность продукции нового поколения, и позволяет учитывать все материальные свойства смесей, такие как термодинамические функции, коэффициенты переноса, удельная мощность излучения и т.д. Чтобы учесть сложность протекания плазменных процессов во времени и пространстве, для более точного описания и предсказания поведения таких систем необходимо использовать пространственно и временно разрешенные численные модели. Данный подход позволит проводить детальный анализ, учитывать нелинейные явления, изучить динамику процессов при проведении теоретических исследований в дополнение к эксперименту.

В литературе часто приводятся данные о термодинамическом равновесии в системах, что позволяет проводить расчеты высокотемпературных процессов [6]. Установление равновесия при высоких температурах происходит быстро, поэтому такие данные довольно точны. Они более точны, чем кинетические параметры и сведения о механизме процесса, которые также приводятся в литературе [7]. Теоретические результаты во многих случаях хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Используя термодинамические расчеты равновесных составов многокомпонентных систем, можно определить основные технологические показатели процесса, такие

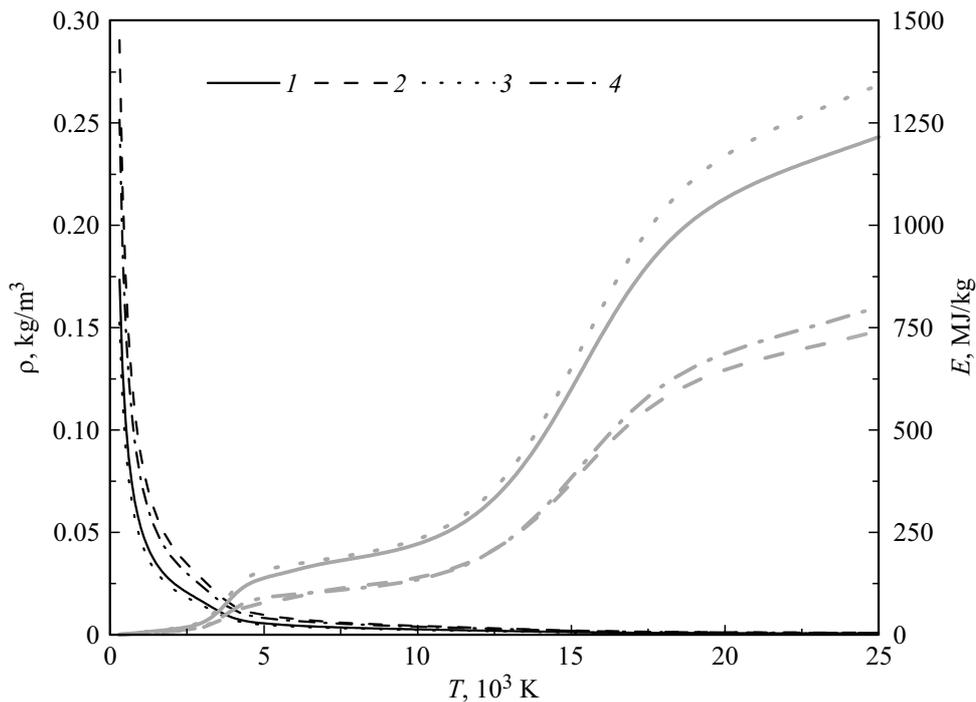


Рис. 1. Зависимости плотности (черные линии) и энтальпии (серые линии) от температуры. Нумерация кривых приведена в соответствии с номером расчета в таблице.

как степень превращения, энергозатраты на получение продукта, а также термодинамические свойства конечных продуктов (теплоемкость, полная энтальпия смеси и т.д.).

Расчет состава плазмы лежит в основе расчета ее термодинамических и транспортных свойств. Рассматриваются четыре плазмообразующие смеси с различными массовыми соотношениями. Параметры расчета приведены в таблице. Рассматривался следующий состав воздуха (по массе): Ar — 1.3%, O₂ — 23.15%, N₂ — 75.55%. Для проведения термодинамических расчетов первым шагом является определение количества компонентов, которые должны быть учтены при расчете. Этот выбор основан на анализе литературных данных о процессе и анализе констант равновесия [8,9].

Для смеси воздуха с водородом рассматривались следующие компоненты: e, H, H⁻, H⁺, H₂, H₂⁺, Ar, Ar⁺, Ar²⁺, Ar³⁺, Ar⁴⁺, Ar⁵⁺, Ar⁶⁺, O, O₂, O⁻, O₂⁻, O⁺, O₂⁺, O³⁺, O⁴⁺, O⁵⁺, O⁶⁺, O₂⁺, N, N⁺, N₂, N₂⁺, N₂²⁺, N₂³⁺, N₂⁴⁺, N₂⁵⁺, N₂⁶⁺, OH⁻, NH, NH⁺, OH, OH⁺, NO, NO⁺.

Для смеси аргона с водородом рассматривались следующие компоненты: e, H, H⁻, H⁺, H₂, H₂⁺, Ar, Ar⁺, Ar²⁺, Ar³⁺, Ar⁴⁺, Ar⁵⁺, Ar⁶⁺.

Для расчета свойств плазмообразующих смесей использовалась база KintechDB, в которой содержатся все необходимые интерполяционные коэффициенты, данные о веществах для расчета термодинамических свойств. Согласно молекулярно-кинетической теории, транспортные свойства плазмы зависят от интегралов столкновений $\Omega^{(L,s)}$, которые представляют собой сечения столк-

новений пар частиц, усредненные по максвелловскому распределению частиц по скоростям. Термодинамический расчет состава плазмы выполнен в предположении, что плазма находится в состоянии термодинамического равновесия при постоянной температуре в диапазоне от 300 до 25 000 К и давлении 1 atm.

Плотность смеси рассчитывалась по уравнению идеального газа $\rho = (P\mu)/(RT)$, где ρ — плотность, μ — молекулярная масса смеси, R — газовая постоянная, T — температура. Теплоемкость смеси определялась как сумма теплоемкостей компонентов, которые находились при помощи интерполяционной функции

$$C_p(T) = \phi_2 + 2\phi_3x^{-2} + 2\phi_5x + 6\phi_6x^2 + 12\phi_7x^3,$$

где ϕ — интерполяционный коэффициент, $x = 10^{-4}T$.

Расчет транспортных свойств, включающих электропроводность, вязкость и теплопроводность, основан на решении интегрально-дифференциального уравнения Больцмана с использованием метода Чепмана и Энскога [10]. Теплопроводность определяется как сумма четырех компонент: контактной теплопроводности тяжелых частиц, контактной теплопроводности электронов, внутренней теплопроводности во втором приближении и реакционной теплопроводности, рассчитанной в соответствии с теорией Мейсона–Мончика [11]. Вязкость, которая является вязкостью тяжелых частиц, вычисляется во втором приближении.

В результате проведенных исследований были получены распределения плотности и энтальпии (рис. 1), теплоемкости и теплопроводности (рис. 2), вязкости и

Параметры расчета

Номер расчета	Компоненты	Массовые соотношения
1	Воздух (95%)+H ₂ (5%)	0.017 Ar/0.3 O ₂ /0.98 N ₂ /H ₂
2	Воздух (98%)+H ₂ (2%)	0.044 Ar/0.78 O ₂ /2.55 N ₂ /H ₂
3	Ar (95%)+H ₂ (5%)	0.95 Ar/H ₂
4	Ar (98%)+H ₂ (2%)	2.45 Ar/H ₂

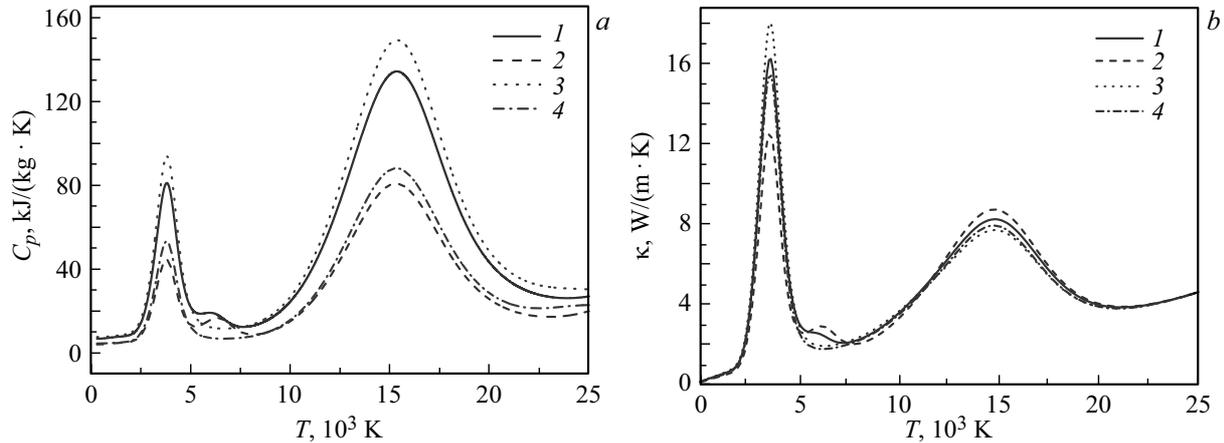


Рис. 2. Зависимости теплоемкости (а) и теплопроводности (b) от температуры. Нумерация кривых приведена в соответствии с номером расчета в таблице.

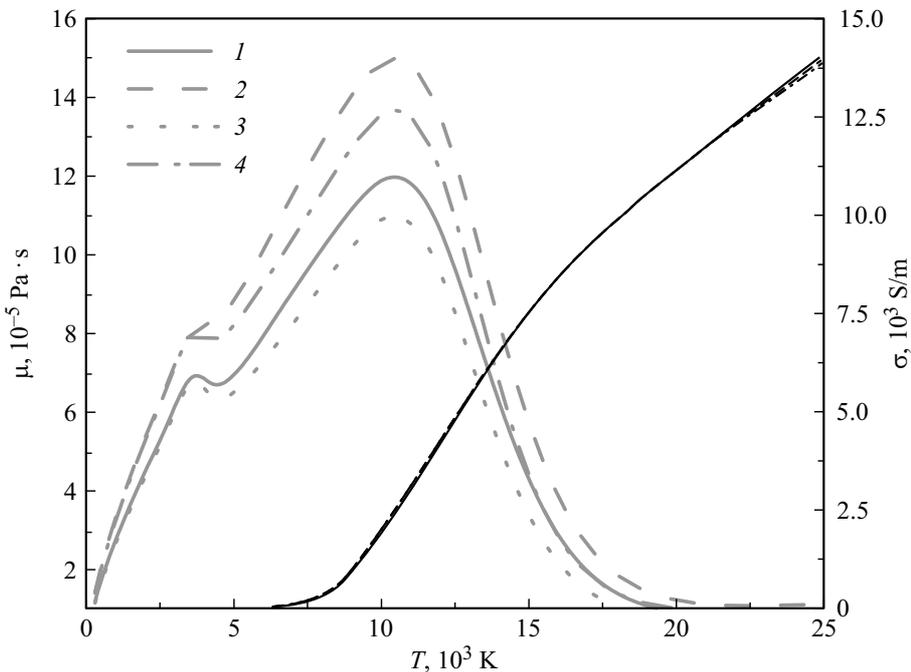


Рис. 3. Зависимости вязкости (серые линии) и удельной электропроводности (черные линии) от температуры. Нумерация кривых приведена в соответствии с номером расчета в таблице.

электропроводности (рис. 3). Зависимости параметров (рис. 1–3) приводятся в соответствии с таблицей: расчет № 1 — 95% воздуха, 5% водорода; расчет № 2 — 98% воздуха, 2% водорода; расчет № 3 — 95% аргона, 5% водорода; расчет № 4 — 98% аргона, 2% водорода.

Из зависимости плотности от температуры (рис. 1) видно, что при температурах свыше 2500 К плотность смеси слабо различается для различных рассматриваемых составов. Водород широко используется в промышленных дуговых и плазменных процессах: например,

водород добавляют в аргон для увеличения передачи тепла к изделию при газовой дуговой сварке алюминия и для повышения энтальпии плазменных струй при плазменном напылении. Из расчета видно (рис. 1), что при равных процентных соотношениях компонентов плазмообразующей смеси воздуха с водородом и аргона с водородом увеличение энтальпии будет происходить в ядре дуги плазмотрона при температурах свыше 15 000 К.

Добавление водорода оказало влияние на теплоемкость и теплопроводность (рис. 2) в диапазоне от 3000 до 5000 К: теплоемкость чистого аргона увеличилась в 180 раз, а воздуха — в 23 раза.

Таким образом, в работе представлены теплофизические свойства смесей воздуха с водородом, аргона с водородом в термической плазме при различных соотношениях. Добавление водорода позволило увеличить энтальпию и теплоемкость плазменных смесей. Полученные результаты в дальнейшем будут использованы для создания численных моделей плазмотрона постоянного тока для напыления.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда грант № 22-29-20223 и Санкт-Петербургского государственного автономного учреждения „Фонд поддержки научной, научно-технической, инновационной деятельности“ (соглашение № 64/2022).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] R. Huang, H. Fukanuma, Y. Uesugi, Y. Tanaka, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **39** (10), 1974 (2011). DOI: 10.1109/TPS.2011.2163828
- [2] M. Hrabovsky, V. Kopecky, V. Sember, T. Kavka, O. Chumak, M. Konrad, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **34** (4), 1566 (2006). DOI: 10.1109/TPS.2006.878365
- [3] A. Martusevich, R. Kornev, A. Ermakov, I. Gornushkin, V. Nazarov, L. Shabarova, V. Shkrinin, *Sensors*, **23** (2), 932 (2023). DOI: 10.3390/s23020932
- [4] V.Ya. Frolov, S.A. Averyanova, D.V. Ivanov, in *Energy ecosystems: prospects and challenges*, ed by N. Kostrikova, *Lecture Notes in Networks and Systems* (Springer, Cham, 2023), vol. 626, p. 135. DOI: 10.1007/978-3-031-24820-7_12
- [5] Z. Zhang, C. Wang, Q. Sun, Sh. Zhu, W. Xia, *Plasma Chem. Plasma Process.*, **42** (4), 939 (2022). DOI: 10.1007/s11090-022-10250-6
- [6] A. Gleizes, Y. Cressault, Ph. Teulet, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **19** (5), 055013 (2010). DOI: 10.1088/0963-0252/19/5/055013
- [7] S.F. Gimelshein, I.J. Wysong, *J. Thermophys. Heat Transfer*, **33** (3), 1 (2019). DOI: 10.2514/1.T5555
- [8] A.B. Murphy, *Plasma Chem. Plasma Process.*, **20** (3), 279 (2000). DOI: 10.1023/A:1007099926249
- [9] M. Capitelli, D. Bruno, A. Laricchiuta, *Fundamental aspects of plasma chemical physics: transport* (Springer, N.Y. 2013).
- [10] С.В. Дресвин, Д.В. Иванов, *Физика плазмы* (Изд-во Политехн. ун-та, СПб., 2013).
- [11] E.A. Mason, L.J. Monchik, *Chem. Phys.*, **36** (6), 1622 (1962). DOI: 10.1063/1.1732790