Расчёт теплофизических свойств плазмы железа

Е.М. Апфельбаум

Объединённый Институт Высоких Температур РАН, Москва, Россия, apfel\_e@mail.ru

Теплофизические свойства различных веществ, такие как давление, внутренняя энергия, коэффициенты переноса (электропроводность) и другие исследуются уже больше века в силу их важности в практических и фундаментальных задачах. Область высоких температур представляет особую сложность для измерений, так как само по себе является проблемой получить равновесное состояние при Т > 5000 К, не говоря уже об измерении чего-то дополнительно. Поэтому в этой области, к которой относится и плазма металлов, число экспериментов существенно меньше, чем количество расчётов. Тем не менее, в последние два десятилетия появились новые измерения электропроводности, давления, внутренней энергии для целого ряда веществ именно в плазменной области [1 – 5]. Это, или ударно-волновые измерения [1, 2], или, эксперименты по электровзрыву проводников (проволочек и фольг) [3 – 5]. В ударно-волновых экспериментах измерения осуществляются на адиабате Гюгонио, при плотностях, как правило, больше критической. В экспериментах по электровзрыву удаётся проникнуть и в область более низких плотностей. При этом так же можно измерить и электропроводность. В обоих подходах, однако, температура не может быть прямо измерена. Поэтому приходится использовать гибридный подход (эксперимент + расчёт), чтобы найти температуру [3, 4]. Тем не менее, эти новые экспериментальные данные позволяют проверить существующие расчётные модели.

Ранее нами была разработана соответствующая модель теплофизических свойств плазмы, которая применялась для благородных газов, полупроводников и ряда металлов [5 – 8]. В её рамках рассчитывается химический (ионный) состав плазмы, давление, внутренняя энергия и электронные транспортные коэффициенты (электропроводность, теплопроводность и термоэдс). Расчёт состава и термодинамики основан на законе действующих масс (см., например, [1, 2, 9]). Электронные коэффициенты переноса рассчитываются в приближении времени релаксации. В настоящей работе мы использовали нашу модель для расчёта указанных выше свойств плазмы железа. Эксперименты по электропроводности такой плазмы представлены на ряде изотерм в [3, 4] при Т = 10 – 30 кK, в диапазоне плотностей от 0,1 до 1 – 2 г/см3. Опять же подчеркнём, что и изотермичность устанавливалась указанным выше гибридным подходом. В более свежих экспериментах [5], было получено калорическое уравнения состояния (зависимость давления от внутренней энергии) и электропроводность на изохорах от ρ0/7 до ρ0/2 (ρ0 = 7,874 г/см3 — плотность железа при Т = 300 К и Р = 1 aтм). Это соответствует области низкотемпературной частично ионизованной плазмы. Наши расчёты проводились при тех же условиях. Полученные результаты находятся в хорошем согласии с результатами измерений и расчётов других авторов.

Литература

1. Грязнов В. К., Жерноклетов М. В. Иосилевский И. Л. и др., ЖЭТФ, (1998) Т. 114, 1242.
2. Gryaznov V., Iosilevski I., Fortov V. E., Contr. Plasma Physics, (1999) V. 39, 89.
3. DeSilva A. W., Rakhel A. D., Contributions to Plasma Physics, (2005) V. 45, 237.
4. DeSilva A. W., Vunni G. B., Phys. Rev. E, (2011) V. 83, 037402.
5. Korobenko V. N., Rakhel A. D., Phys. Rev. B, (2013) V. 88, 134203.
6. Apfelbaum E. M., Contributions to Plasma Physics, (2011) V. 51, 395.
7. Apfelbaum E. M., Contributions to Plasma Physics, (2013) V. 53, 317.
8. Apfelbaum E. M., Phys. Plasmas, (2015) V. 22, 092703.
9. Kuhlbrodt S., Holst B., Redmer R., Contributions to Plasma Physics, (2005) V. 45, 73.