

ПРОБЛЕМА КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКИ УРАНА

Иосилевский И.Л.¹, Грязнов В.К.², Украинец А.В.¹, Ромадинова Е.А.¹

¹МФТИ (ГУ) Москва, ²ИПХФ РАН, Черноголовка

ilios@orc.ru

Основу сегодняшних знаний параметров критической точки (КТ) для большинства металлов, включая металлический уран и его соединения (UO_2 , UN, UC etc.) составляют теоретические оценки. Доминирующими среди них являются оценки на основе далекой экстраполяции известных низкотемпературных свойств конденсированной фазы. Эта процедура существенно не единственна [1] и приводит к крайней неопределенности в результатах оценок критической температуры урана: от $T_c \sim 11 \div 13$ kK (Grosse, 1961; Фортов и др., 1975) до $T_c \sim 5000 \div 6000$ K (Shaner, Young, 1977; Иосилевский, 1991). Альтернативный подход опирается на гипотезу о «плазменной» природе критического состояния в металлах (Ликальтер, 1981) и оценивает критическую температуру, исходя из величины потенциала ионизации. Это дает $T_c \approx 9000$ K [2]. Очевидно, что теоретические оценки параметров КТ урана находятся в явном противоречии, и противоречие такого масштаба является чрезвычайным [1][3]. Это противоречие становится еще более красноречивым при сравнении конкурирующих предсказаний высокотемпературной части кривой давления паров урана, $P_s(T_s)$ со справочными и экспериментальными данными (Рис.1).

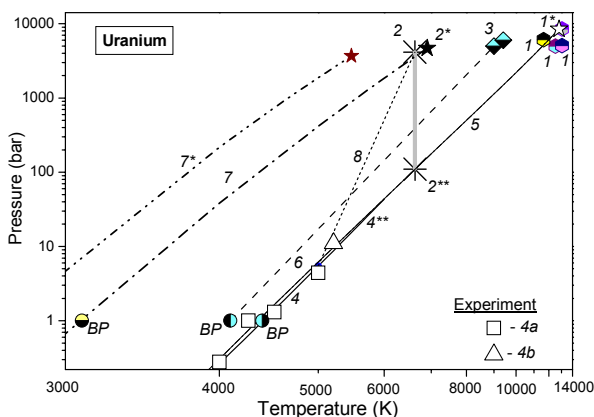


Рис. 1. P - T диаграмма урана.

Оценки критической точки: 1 – на основе калорических свойств жидкого U ([4][5] и др.); 2, 2*, 2** – на основе термических свойств жидкого U [6][1]; 3 – на основе «плазменной» гипотезы [2][7]; **Давление паров $P_s(T_s)$:** 4a – эксперимент [8]; 4b – точка кипения при $P = 1,1$ МПа [9]; 4 – рекомендация справочника [10]; 5 – расчет по химической модели с калибровкой по калорическим свойствам жидкости (звезда – крит. точка); 6 – гипотетическая кривая насыщения урана [7], совместимая с «плазменной» гипотезой [2] (BP – точка кипения); 7 – расчет по химической модели (код SANA-U [11][3]) с параметрами УРС рекомендованными в [6]; 7* – то же с калибровкой по эксп. данным термическим свойствам жидкости [12] (2** – крит. точка); 8 – гипотетический (аномальный) ход кривой насыщения, совмещающий справочные данные [8][10] с критической точкой (2–2*).

Помимо урана наличие обсуждаемой аномалии характерно для целой группы металлов - V, Co, Mo, Ta, W и др. Оно непосредственно связано [1][13] с низкой величиной безразмерного параметра $\eta^* \equiv kT^*/\Delta_s H^0$, которая для этой группы составляет: $\eta^* \sim 0.15 \div 0.20$. Для сравнения - в «благополучных» Li, Al и Cu $\eta^* \approx 0.3$. {здесь $T^* \equiv T_{\text{melt}} + (\alpha_P)^{-1}$, $\Delta_s H^0$ – теплота сублимации, и $\alpha_P \equiv \rho^{-1}(\partial \rho / \partial T)_P$ – коэффициент термического расширения.}

Среди возможных объяснений обсуждаемого противоречия теоретических оценок параметров критической точки урана можно выделить два главных [1] [3]:

(А) – Ошибочность существующих экспериментальных данных:

- одновременная ошибка в согласующихся между собой статических [12] и динамических [6][9][14] измерениях плотности жидкого урана $\rho_{\text{ж}}(T)$.
- в измерениях давления насыщения урана $P_s(T_s)$ при $T \leq 5000$ K [8] (см. рис.1).
- в измерениях теплоты сублимации $\Delta H_s(T_s)$ и теплоемкости жидкого урана до $T \leq 5000$ K [9], служащих базой для справочных данных по давлению паров, рекомендованных в [10]

(В) – Искажения (аномалии) традиционной формы границы испарения, и прежде всего:

- потеря выпуклости фазовой границы урана в $\rho \leftrightarrow T$ координатах (аномальное искривление вверх $\rho_{\text{ж}}(T)$)
- аномальное искривление фазовой границы в $P \leftrightarrow T$ координатах (потеря квазилинейности в $\ln P \leftrightarrow 1/T$)

Решение обсуждаемой проблемы и вопрос об истинных параметрах критической точки урана (и ряда его соединений) в настоящий момент остается открытым. Любое из объяснений (А, В) требует экспериментальной проверки. Вместе с тем анализ указанных противоречий заставляет искать возможность аномалии в свойствах фазового равновесия в плазме урана в сравнении с переходом газ-жидкость в «хороших» металлах [1]. Результаты исследования перехода газ-жидкость в модели однокомпонентной плазмы [13] и изучение аномальных свойств неконгруэнтного фазового равновесия в плазме двуокиси урана [15] дают ряд серьезных аргументов для объяснения возможности таких аномалий.

Обсуждаемое противоречие в существующих оценках критических параметров урана делает актуальным как обсуждение надежности существующих экспериментальных данных, так и перспектив постановки новых решающих экспериментов. Важной в этом отношении является адекватная интерпретация экспериментов по изотропическому расширению ударно сжатого урана [16]. В настоящей работе кинематические данные [16] изотропы, выходящей из точки с параметрами $U_0 = 3.49$ км/с, $P_0 = 71,5$ ГПа на ударной адиабате пористого урана ($m = 4.76$), были проинтегрированы вдоль кривой, интерполирующей данные эксперимента. Полученная в результате этой процедуры термодинамическая информация – поведение внутренней энергии, как функция давления расширения на изотропе $E(P)_s$, сравнивалась с теоретическими вариантами фазовой границы испарения в P - E координатах (Рис.2). Полученные результаты обнадеживают. Слабый излом, наметившийся на изотропе в районе $P = 1$ ГПа, в целом соответствует излому от пересечения высокотемпературного, «калорического» варианта границы испарения с $T_c \approx 12790$ K и $P_c \approx 845$ ГПа, и не соответствует

«термическому» варианту этой границы ($T_c \approx 5460$ К и $P_c \approx 367.5$ ГПа). Этот факт подчеркивает целесообразность проведение аналогичного сравнения для всей совокупности результатов эксперимента [16] [17].

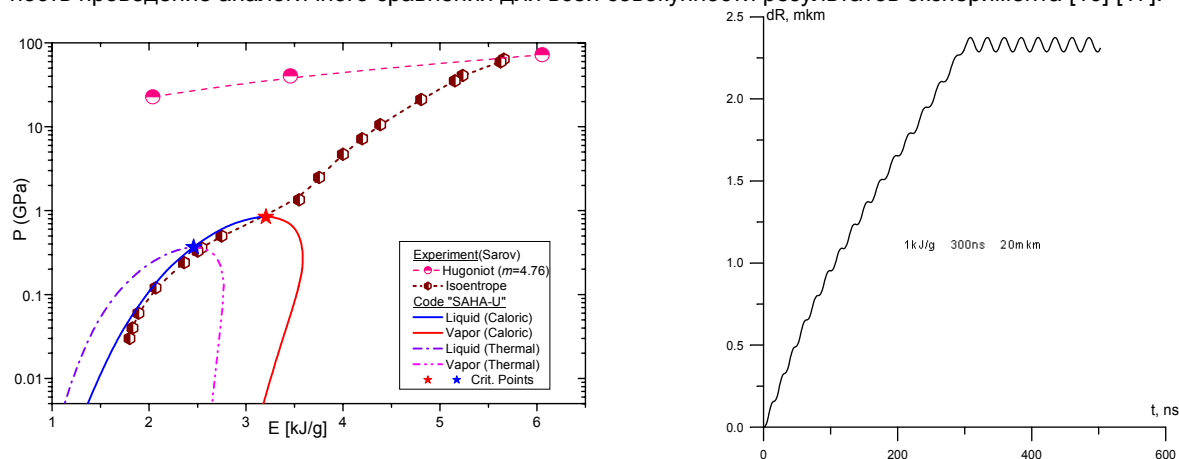


Рис. 2. Параметры изэнтропического расширения урана. Экспериментальные данные [16] в сравнении с двумя вариантами расчета границы фазового перехода газ-жидкость по химической модели (код SAHA-U): «термическим» (кривая 7* на Рис.1) и «калорическим» (кривая 5 на Рис.1).

Рис. 3. Численное моделирование расширения поверхности тонкой урановой фольги (20 мкм), объемно нагреваемой прямоугольным ионным импульсом ($\tau = 300$ нс) с суммарным энерговыделением 1 кДж/г (код [19]).

В плане подготовки нового эксперимента ранее формулировались [1][18][19] предложения о возможности реализации квази-изобарического режима объемного нагрева образца урана под действием пучка тяжелых ионов (НИВ). В настоящей работе было проведено численное моделирование газодинамики расширения тонкой урановой фольги ($\delta \sim 20$ мкм) идеализированным прямоугольным импульсом НИВ с длительностью $\tau \sim 300$ нс и энерговыделением $\Delta E \sim 1$ кДж/г. В расчетах, развивающих методику [18], использовалось реальное многофазное уравнение состояния урана (жидкого и газо-плазменного), рассчитанное в рамках модифицированной химической модели плазмы с использованием кода SAHA-U [1]. На Рис.3 показано движение поверхности фольги, представляющее собой суперпозицию плавного квази-изобарического расширения мишени на стадии нагрева ($t < \tau$) и микроколебаний поверхности на стадии релаксации ($t > \tau$). Расчет призван проиллюстрировать главную идею, состоящую в том, что точное измерение перемещения границы фольги, например традиционными методами лазерной интерферометрии, если нагреваемым материалом является металл (U), или модификацией метода [20], если это керамика (UO_2), позволит связать результаты измерений с термодинамическими параметрами образца: Измерение темпа расширения образца на стадии нагрева ($t < \tau$) позволит получить информацию о коэффициенте термического расширения. Измерение частоты колебаний – о величине скорости звука материала мишени, а амплитуды колебаний – о его коэффициенте Грюнайзена.

Работа поддержана грантами CRDF № MO-011-0, МНТЦ 2107, а также Программой поддержки НПК Высшей школы N 132.05 МФТИ и Программой научных исследований РАН «Теплофизика и механика экстремальных энергетических воздействий» и Научной программой МинВуз-Минатом РФ, 2004 г. N 775/04

1. Иосилевский И.Л. // *Физика экстремального состояния вещества* / Под ред. Фортова В.Е., М.: ИВТАН, 1991, С.106 / Черногловка: ИХПФ РАН, 2002, С.37 / Черногловка: ИХПФ РАН, 2003, С.128.
2. Ликальтер А.А. // ДАН СССР. 1981. Т.269. С.96; УФН. 2000. Т.170. С.831; Physica Scripta. 1997. Т.55. С.114.
3. Iosilevskiy I., Gryaznov V. // J. Nuclear Materials. 2005. (submitted).
4. Hornung K. // J. Appl. Phys. 1975. V.46. P.2543.
5. Фортов В.Е., Дремин А.Н., Леонтьев А.А. // ТБТ 13 1072 (1975),
6. Young D. et al. UCRL-52352, LLNL, Univ. California.1977; Gathers G. et al. // Rep. Progr. Phys. 1986. V.49 341 (1986);
7. Hess H., Schneidenbach H. // Z. Metallkunde 92 399 (2001)
8. Hultgren, R. et al. Selected Values of Thermodynamic Properties, Am. Soc. for Metals, Metals Park, Ohio 1973.
9. Mulford R., Sheldon R. // J. Nuclear Materials, 1988. V.154. P.268 // ibid. 1991. V.185. P.297.
10. Термодинамические свойства индивидуальных веществ (Ред. В.П. Глушко) М.: Наука, 1982
11. Грязнов В.К., Иосилевский И.Л., Фортов В.Е. Термодинамические свойства низкотемпературной плазмы. Том приложений к Энциклопедии по физике низкотемпературной плазмы, М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.
12. Шпильрайн Э.Э. и др. // ТБТ. 1986. Т.26. С.892.
13. Иосилевский И.Л., Красников Ю.Г., Сон Э.Е., Фортов В.Е. *Термодинамика и транспорт в неидеальной плазме*. М.: Изд-во МФТИ, 2002; Москва: Изд-во ФИЗМАТЛИТ, 2005 (в печати).
14. Voiveneau M., Arles L. et al. // Physica B. 1993. V.190. P.31.
15. Иосилевский И.Л., Грязнов В.К. и др. // Вопросы Атомной Науки и Техники (ВАНТ). 2003, вып.1(61), С.3; Ronchi C. Iosilevskiy I., Yakub E. *Equation of State of Uranium Dioxide*. Berlin: Springer, 2004, 366 PP.
16. Жерноклетов М.В. // ТБТ. 1998. Т.36. № 2. С.231.
17. Фунтиков А.И. // ТБТ. 1998. Т.36. № 3. С.406.
18. Ромадина Е.А., Иосилевский И.Л., Грязнов В.К. // *Физика Экстремальных Состояний Вещества* / Ред. В.Е.Фортов. Черногловка: ИХПФ РАН, 2004. С.153.
19. Iosilevski I., Gryaznov V. // 14th Int. Symposium on Heavy Ion Fusion. 2002. Moscow, Abstracts, P.98.
20. Козин Г.И., Кузнецов А.П. и др. // *Приборы и Техника Эксперимента*. 2003. № 2, С.1.

(*) XX Международная конференция, «Воздействие интенсивных потоков энергии на вещество» Эльбрус, 1-6 марта 2005.