

ТЕРМОДИНАМИКА ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ СВИНЦА В ОКРЕСТНОСТИ КРИВОЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО КИПЕНИЯ

*В.Г.Агеев, А.В.Бушман, М.И.Кулиш, М.Е.Лебедев,
А.А.Леонтьев, В.Я.Терновой, А.С.Филимонов,
В.Е.Фортгов*

Для изучения термодинамики плотной плазмы металлов в околокритической области впервые применены температурные измерения. Приведены результаты регистраций температуры на изэнтропах разгрузки образцов свинца нормальной плотности, ударносжатых до состояний с давлениями 1 и 1,6 Мбар. Зафиксированы давления при вхождении изэнтроп в двухфазную область жидкость – пар.

Поведение жидких сильнонагретых металлов в промежуточной между твердым телом и нейтральным паром области фазовой диаграммы представляет в настоящее время повышенный интерес¹ как с принципиальной точки зрения, так и для многих приложений, связанных с процессом импульсной генерации высокой локальной концентрации энергии. Наличие в этой области сильного и сложного по структуре межчастичного взаимодействия в условиях неупорядоченности системы существенно затрудняет применение надежных теоретических методов, что создает почву для разнообразных гипотез относительно качественного вида фазовой диаграммы металлов в сильнонеидеальной области параметров.

У металлов ожидаемые значения критических температур² сравнимы с потенциалами ионизации и вследствие этого их высокотемпературное испарение происходит непосредственно в неидеальную плазменную фазу, минуя, в отличие от классических жидкостей, область нейтрального пара. Зельдович и Ландау³, по-видимому, первые обратили внимание на то, что это может привести к дополнительным фазовым переходам, качественно искажающим традиционный ход кривой кипения в ее высокотемпературной части. В дальнейшем был выдвинут также ряд гипотез относительно появления в околокритической области металлов плазменных⁴ и кластерных⁵ фазовых переходов. Однако экспериментальное исследование плотных высокотемпературных плазменнометаллических состояний методами традиционного стационарного эксперимента вряд ли возможно, так как для подавляющего большинства металлов (исключение составляют щелочные металлы и ртуть) температуры и давления в критической точке значительно превосходят термостойкие пределы конструкционных материалов экспериментальных установок¹.

В настоящей работе для изучения термодинамики сильнонагретой жидкости и плотной плазмы свинца в окрестности кривой высокотемпературного кипения использован динамический метод генерации этих состояний, основанный на изэнтропическом расширении металла, предварительно сжатого и нагретого во фронте мощной ударной волны⁶. В отличие от предшествующих работ^{7,8}, проведенных по этой методике и содержащих результаты только кинематических измерений, приведены результаты впервые выполненных температурных регистраций в околокритической области. Измеряемая в волне разгрузки температура, в отличие от скорости расширения, значительно более чувствительна к процессу испарения металла, поскольку переход из однофазного состояния в парожидкостную область соответствует переходу от степенной к экспоненциальной зависимости равновесной температуры от давления. Таким образом, место излома экспериментально измеренной зависимости температуры на изэнтропе фиксирует ее пересечение с линией равновесия жидкость – пар, а нижний участок экспериментальной кривой, ввиду однозначной связи температуры и давления внутри двухфазной области, определяет положение линии испарения на фазовой плоскости.

Для получения в свинцовых мишенях ударных волн высокой интенсивности использовались высокоскоростные взрывные линейные генераторы ударных волн, ускоряющие продуктами детонации конденсированных взрывчатых веществ ударники диаметром 60 мм из стали (толщина 1 мм) и алюминия (2 мм) до скоростей 5,0 и 5,4 км/с соответственно. При их высокоскоростном соударении с образцами свинца нормальной плотности генерировались ударные волны с давлением во фронте 1,6 и 1 Мбар соответственно. Скорость ударников и интенсивность ударных волн в исследуемых свинцовых мишенях контролировалась в специальной серии экспериментов. Размеры ударников и мишеней были выбраны таким образом, чтобы исключить влияние волн разгрузки, распространяющихся с тыльной стороны ударника.

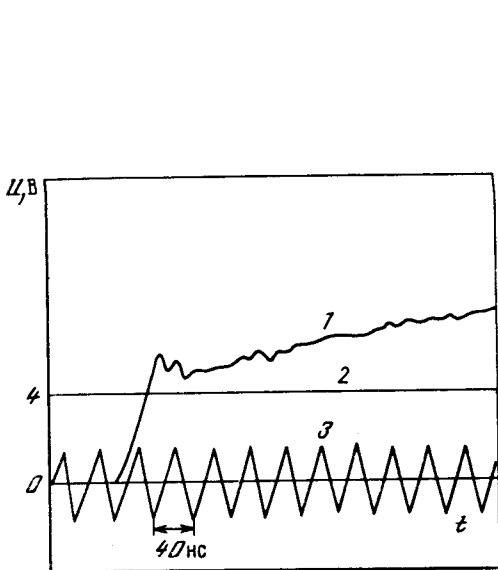


Рис. 1

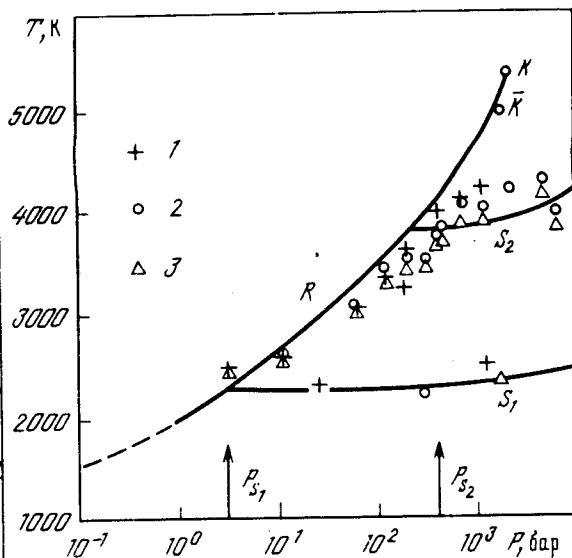


Рис. 2

Рис. 1. Типичная осциллограмма регистрации интенсивности светового излучения (1). Отмечены амплитуда сигнала калибровки (2) величиной 4 В и масштабная временная синусоида (3) с частотой 25 МГц

Рис. 2. Фазовая диаграмма свинца.

Сплошные линии – расчет ⁸ линии равновесия жидкость – пар (R) с критической точкой (K) и изэнтроп разгрузки (S), пунктир – статические данные по давлению паров свинца ¹⁰, \bar{K} – оценка параметров критической точки ², значки – результаты регистраций температуры кремниевыми фотодиодами (1) и двухканальным пирометром (2 – $\lambda_1 = 449$ нм, 3 – $\lambda_2 = 560$ нм). $P_{S_1} = 3$ бар и $P_{S_2} = 420$ бар – давления на кривой испарения при вхождении изэнтроп в двухфазную область

Фиксация давления в волне изэнтропического расширения проводилась путем измерения скорости разгрузки ударносжатого свинца в гелий различного начального давления. Малый атомный вес и высокий потенциал ионизации гелия обеспечивают его прозрачность для выходящего из плотной плазмы свинца оптического излучения. Определение температуры плазмы осуществлялось по регистрации оптического излучения кремниевыми фотодиодами, размещаемыми непосредственно в экспериментальной сборке, и двухканальным пирометром на длинах волн 449 ± 5 нм и 560 ± 5 нм, выделяемых интерференционными светофильтрами, с использованием фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) СНФТ-3 и ЭЛУ-31ФК. Для вывода излучения из экспериментальной сборки к ФЭУ использовались диафрагмируемые волоконно-оптические линии связи, обеспечивающие высокую помехозащищенность регистрирующей аппаратуры и четкую локализацию размера исследуемого участка поверхности. Калибровка пирометров осуществлялась с помощью ленточной вольфрамовой лампы при температурах

до $T = 2800$ К с точностью 3%, регистрация электрических сигналов проводилась на скоростных осциллографах С9-4А с полосой пропускания 0,5 ГГц.

Типичная осциллограмма интенсивности светового излучения, соответствующая умеренным параметрам расширения металла в область жидкой фазы, представлена на рис. 1. Видно, что амплитуда регистрируемого сигнала слабо меняется при временах $20 - 500$ нс после выхода ударной волны на свободную поверхность. Таким образом за характерные времена динамического эксперимента ~ 1 мкс значение яркостной температуры крайне незначительно растет (рост сигнала на 5 - 7% соответствует увеличению температуры на 1%), что указывает на термодинамическую равновесность исследуемой системы.

Результаты проведенных температурных измерений на изэнтропах свинца в окрестности кривой высокотемпературного кипения нанесены на рис. 2, где каждая экспериментальная точка получена усреднением 2 - 3 опытов при проведении двух - трех независимых регистрациях яркостной температуры в каждом из них. Зарегистрированы практически совпадающие значения яркостных температур. На рис. 2 представлены также данные статических измерений насыщенных паров ¹⁰ и результаты расчета температуры на экспериментальных изэнтропах и кривой кипения, полученные по широкодиапазонному уравнению состояния свинца ⁸. Сравнение экспериментальных данных с расчетными результатами согласно уравнению состояния ⁸, построенному на основе данных кинематических измерений ^{7, 8}, свидетельствует об их близости и подобии при давлениях $P \gtrsim 30$ бар. В то же время при более низких давлениях наблюдается нарастающее отклонение экспериментально измеренных температур от расчетной кривой испарения и данных статических измерений. Это отклонение, находящееся вне пределов экспериментальной погрешности, связано, видимо, с термодинамической неравновесностью процесса расширения в области низких давлений и малых плотностей. Определенный тем самым нижний предел применимости метода изэнтропического расширения является дополнительным экспериментальным подтверждением результатов анализа кинетики испарения и конденсации металлов в волнах изэнтропической разгрузки ⁹.

С целью выяснения вопроса о равновесности термодинамических состояний в двухфазной области было проведено исследование процесса расширения свинца из начального состояния ударного сжатия при давлении 2,4 Мбар, реализованного за счет использования взрывного генератора повышенной интенсивности. Экспериментально было показано, что при изэнтропическом расширении свинца из различных начальных состояний $P = 1,6$ Мбар и $P = 2,4$ Мбар до одинакового конечного давления $P = 250$ бар измеренные значения температуры также совпадают и равны $T = 3700$ К. Это свидетельствует о равновесности расширения свинца в двухфазной области параметров независимо от значения энтропии и является дополнительным доказательством наличия термодинамического равновесия в системе при характерном времени процесса ~ 1 мкс.

Выполненные температурные измерения, как и более ранние регистрации кинематических параметров ^{7, 8}, свидетельствуют об отсутствии заметных термодинамических аномалий, которые можно было бы связать с фазовыми переходами в сильнонеидеальной плотной плазме ^{4, 5} или переходами металл - диэлектрик в неупорядоченных металлических структурах ³. Проведенные исследования позволили с достаточной определенностью зафиксировать начало испарения металла при вхождении изэнтропы в двухфазную область и, что особенно важно, в одной серии опытов экспериментально определить кривую высокотемпературного кипения свинца в широком диапазоне давлений $P = 50 \div 10^3$ бар, более чем в 10^3 раз превышающих давления при статических измерениях ¹⁰.

Литература

1. Фортвов В.Е. УФН, 1982, 138, 361.
2. Фортвов В.Е., Дремин А.Н., Леонтьев А.А. ТВТ, 1975, 13, 1072.
3. Зельдович Я.Б., Ландау Л.Д. ЖЭТФ, 1944, 14, 32.

4. *Норман Г.Э., Старостин А.Н.* ТВТ, 1970, 8, 413.
5. *Храпак А.Г., Якубов И.Т.* ЖЭТФ, 1970, 59, 945.
6. *Зельдович Я.Б.* ЖЭТФ, 1957, 32, 1577.
7. *Альтшулер Л.В., Баканова А.А., Бушман А.В. и др.* ЖЭТФ, 1977, 73, 1866.
8. *Альтшулер Л.В., Бушман А.В., Жерноклетов М.В. и др.* ЖЭТФ, 1980, 78, 741.
9. *Фортов В.Е., Леонтьев А.А.* ТВТ, 1976, 14, 711.
10. *Несмеянов А.Н.* Давление пара химических элементов. М.: Наука, 1961.

Институт химической физики
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
29 сентября 1988 г.