

## МЕТОД МЕТАЛЛИЧЕСКОГО Z-ПИНЧА: ИЗЭНТРОПИЧЕСКОЕ СЖАТИЕ ВОДОРОДА

*В. В. Прут, В. А. Храбров, В. В. Матвеев,  
С. А. Шибанов*

Рассматривается методика применения металлического Z-пинча для получения высоких (мегабарных) давлений и измерения адиабатического уравнения состояния веществ, в частности водорода.

Уравнение состояния водорода в области высоких давлений измерено статическим методом до 25 кбар (ограничение из-за прочности конструкций) и ударноволновым методом  $H_2$  — до 40 кбар,  $D_2$  — до 900 кбар (ограничение из-за сильного нагрева — до  $T \approx 7000$  К). Расширение этого диапазона может быть достигнуто, по-видимому, только адиабатическим методом, который позволяет создавать очень высокие степени сжатия при относительно малом нагреве. Известные варианты этого метода [1 – 3] основаны на различных способах преобразования детонационной волны во взрывчатом веществе в адиабатические волны сжа-

тия в исследуемом веществе и облужении водородной мишени лазерным, электронным или ионным пучками.

Рассмотрим методику и экспериментальные результаты по созданию высоких ( $\sim 10^5, 10^6$  бар) давлений и измерения уравнения состояния в так называемом металлическом Z-пинче. Суть его заключается в следующем: вдоль металлической трубки, внутри которой находится исследуемое вещество, в частности водород, протекает импульс тока, создаваемый конденсаторной батареей; в результате взаимодействия тока с собственным магнитным полем трубка сжимается (Z-пинч), что приводит к увеличению давления в веществе. При этом можно осуществить два режима сжатия: квазистатический и динамический. При квазистатическом сжатии, когда инерционное время много меньше характерного времени разряда, давление внутри вещества  $P_B = P_M$  — давлению маг-

нитного поля ( $P_M = \int j H dr$ ). Максимально возможное магнитное давление ограничено электрическим взрывом проводника — на современных "быстрых" конденсаторных батареях с энергией  $\lesssim 1$  Мдж:  $P_M \lesssim 1$  Мбар. Поэтому, увеличение давления реально возможно только при динамическом сжатии, в известной степени аналогичном применяющемуся при сжатии плазмы для создания импульсного термоядерного реактора.

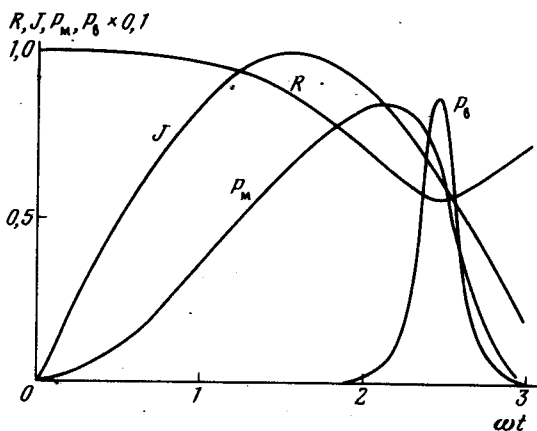


Рис. 1. Временные зависимости тока  $I$ , внешнего радиуса  $R$ , магнитного давления  $P_M$  и давления водорода  $P_B$

При динамическом сжатии давление внутри вещества может значительно, как показывают численные расчеты для  $H_2$  в нормальных условиях по крайней мере в  $\sim 10$  раз, превосходить давление магнитного поля. Качественно (см. также рис. 1) это объясняется тем, что сначала, когда магнитное давление (с учетом распределения кинетической энергии) превышает давление внутри вещества, происходит ускорение трубки (и это возможно, например, из-за сильной сжимаемости водорода в нормальных условиях), а затем трубка тормозится все возрастающим давлением вещества, и кинетическая энергия трубки переходит во внутреннюю энергию (давление) вещества внутри и самой трубки. При этом, если трубка движется "слишком быстро", т.е. когда скорость фронта волны сжатия превышает скорость звука, то развивается ударная волна, в противном случае процесс — квазиизэнтропичен.

Необходимый режим достигается выбором оптимальных параметров трубки, цепи и начального состояния исследуемого вещества, который определяется численным расчетом.

В данной работе использована конденсаторная батарея с полупериодом тока  $\approx 5$  мксек и максимальным магнитным давлением  $< 50$  кбар. Начальное состояние водорода — газообразное;  $T \approx 80$  К. Измерялись: радиус внешней границы в перпендикулярном оси трубки направлении — скоростным фоторегистратором СФР-2М в непрерывном режиме с искровой подсветки и ток — поясом Роговского.

Поскольку уравнение состояния, вообще говоря, есть зависимость между тремя параметрами, например: давлением  $P$ , удельным объемом  $V$  и энтропией  $S$ , то в предположении постоянства одного из них —  $S$ , необходимо измерить два независимых параметра, которыми являются радиус трубки и ток. Измерение радиуса практически непосредственно определяет плотность (в отсутствие течения вдоль оси), а давление внутри вещества определяется в результате численного моделирования процесса, которое заключается в следующем. Система законов сохранения, реологическое уравнение состояния, уравнение состояния меди и водорода, их теплофизические и электрофизические характеристики решались при измеренном токе. Для меди — вещества трубки использовалась вязкопластическая модель сплошной среды с коэффициентом вязкости, определенным экспериментально. Для водорода термодинамические функции в нулевом приближении аппроксимировались по [4], где одной функциональной зависимостью описывалось твердое, жидкое и газообразное состояния с учетом свободного вращения молекул и внутримолекулярных колебаний, а параметры подбирались так, чтобы уравнение состояния при  $T \approx 4$  К и  $P \leq 25$  кбар; дебаевская температура и параметр Грюнайзена при  $P \approx 0$  совпадали с известными достоверными экспериментальными значениями [5, 6]. Затем — в первом приближении в энергию аддитивно вводилась функция, содержащая свободный параметр  $\xi$ , подлежащий определению в области давлений, недостижимых в [5]. Вычисленный радиус  $R$  внешней границы трубки сравнивался с измеренным  $\tilde{R}$  критерием, определяющим меру погрешности,

служил функционал  $G = \int (R - \tilde{R})^2 dt$ , минимизация которого по  $R$  достигается вариацией уравнения состояния (параметра  $\xi$ ) и тем самым приводит к получению экспериментального адиабатического уравнения состояния.

Представленные на рис. 1 зависимости иллюстрируют типичный пример расчетов, а на рис. 2 — принятое уравнение состояния водорода при  $\xi = 0$ .

Ошибка определения плотности обусловлена в основном только погрешностью измерения радиуса и равна  $\Delta\rho/\rho \sim 5\%$ ; ошибка определения давления обусловлена погрешностями измерения тока, радиуса и неопределенностью всех принятых в расчетах моделей и коэффициентов, оценка  $\Delta P/P \sim 30\%$ . Максимально измеренное давление составляет величину  $\sim 200$  кбар, однако полученная точность недостаточна для анализа известных теоретических уравнений состояния водорода.

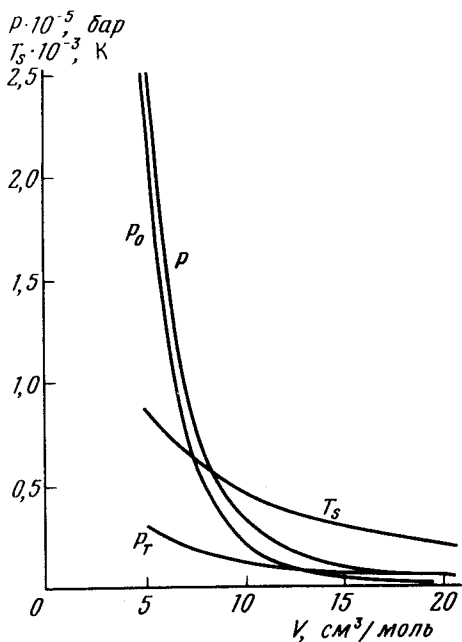


Рис.2. Адиабатическое уравнение состояния  $P(V)$ , нулевая изотерма  $P_0$ , тепловое давление  $P_T$  и адиабатическая температура  $T_S$

Предположение о квазиизэнтропичности процесса подтверждается непосредственными численными расчетами (где, естественно, допускаются образование ударных волн) — разница между средней по всему объему водорода расчетной температурной и средней адиабатической не превосходила 1% и лежит в пределах погрешности расчетов по разностной схеме.

В заключение отметим, что изложенный метод, позволяя создавать и измерять давление мегабарного диапазона, дает сравнительно простую (и, по-видимому, реальную) возможность металлизации водорода (см. [7]); основная трудность состоит в увеличении (и контроле) точности измерения давления.

Авторы глубоко признательны Ю.Кагану и Н.А.Черноплекову за обсуждение этой работы.

Институт атомной энергии  
им. И.В.Курчатова

Поступила в редакцию  
27 октября 1978 г.

### Литература

- [1] R.S.Hawke, D.E.Duerre, J.G.Huebel, R.N.Keeler, H.Klapper. Phys. Earth Planet. Interiors, 6, 44, 1972.
- [2] Ф.В.Григорьев, С.Б.Кормер, О.Л.Михайлова, А.П.Толочко, В.Д.Урлин. ЖЭТФ, 69, 743, 1975.
- [3] Проблемы лазерного термоядерного синтеза. М., Атомиздат, 1976.
- [4] В.В.Прут. Об интерполяции уравнения состояния водорода. М., ИАЭ-3026, 1978.
- [5] M.S.Anderson, C.A.Swenson. Phys. Rev., 10, 3184, 1974.
- [6] G.Ahlers. J.Chem. Phys., 41, 86, 1964.
- [7] Ю.Каган, В.В.Пушкарёв, А.Холас. ЖЭТФ, 73, 967, 1977.