

ПОЛУЧЕНИЕ ТЕПЛОГО ПЛОТНОГО ВЕЩЕСТВА С ПОМОЩЬЮ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В МАЛОПЛОТНОМ ПЛАСТИКЕ

С.Ф. Гаранин, Е.М. Кравец, С.Д. Кузнецов

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Введение

Теплым плотным веществом (ТПВ) [1] называют состояние вещества в промежуточной области между конденсированным веществом и идеальной плазмой, более горячее, чем обычное конденсированное вещество, но более холодное и более плотное, чем традиционная идеальная плазма. В этой области состояния, которую часто характеризуют диапазоном температур $1 < T < 50$ эВ и плотностью в диапазоне $0.01\rho_0 < \rho < 2\rho_0$ (ρ_0 – твердотельная плотность), вещество не может описываться теориями, применимыми для идеальной плазмы или для конденсированного (твердотельного) вещества. Задача получения ТПВ представляет интерес для ряда явлений. ТПВ встречается в ядрах газовых планет-гигантов, а в технических и физических приложениях образуется в системах, испытывающих быстрый переход от твердого состояния в плазму, таких как взрывающиеся проволочки и быстро нагреваемое (под действием, например, лазерного излучения или сильных магнитных полей) вещество.

Для получения ТПВ используются различные экспериментальные методы: изохорический нагрев [2], изобарическое расширение [3-4], ударное сжатие низкоплотной плазмы, ударное сжатие конденсированного вещества пластинами или лайнерами, разгоняемыми магнитным полем (см., например, [5, 6]). В работах [7, 8] рассматривался электровзрыв металлической фольги для изучения образования ТПВ и измерения его электрического сопротивления и уравнения состояния (УрС-а).

Перспективным методом получения ТПВ и определения его УрС-а является ударное сжатие низкоплотного пористого вещества (пены) с помощью высокоскоростных драйверов, таких как электрофизические или лазерные установки. В работе [9] с помощью лазерной установки Nike проводились измерения ударной адиабаты пены СН с начальной плотностью ~10% от твердого полистирола в диапазоне давлений 2-9 Мбар. Скорости ударной волны и массовые скорости вещества доходили в экспериментах до сотни км/с. Однако результаты измерений ударной адиабаты в экспериментах довольно сильно отличались от предсказаний моделей УрС-ов SESAME и CALEOS, что само по себе не очень удивительно, поскольку область ТПВ является трудной для теоретического описания. Несколько странно, однако, что сами ударные адиабаты SESAME и CALEOS не ведут себя при относительно малых давлениях (<100 кбар) разумно с теоретической точки зрения: не стремятся к конденсированной плотности, как это должно быть для пористого вещества при низких давлениях [10], и не согласуются в этой области с экспериментом.

Мы решили построить ударную адиабату для пенного полистирола, подобрав параметры в трехчленном УрС-е, форма которого была ранее предложена нами для алюминия и меди [11], и который имеет правильное асимптотическое поведение при низких и высоких температурах. Цель этой работы – определить, насколько хорошо можно описывать ударную адиабату для пористого пластика, пользуясь трехчленным УрС-ом [11], а также определить диапазон ударной адиабаты для пористого материала, в котором вещество будет находиться в состоянии ТПВ. Зная этот диапазон, можно планировать эксперименты с электрофизическими и лазерными драйверами для исследования ТПВ.

1. Уравнение состояния пластика

УрС металлов [11] имеет аналитическую форму. Давление p и внутренняя энергия представляются в виде суммы трех членов, которые зависят от температуры T и плотности ρ

$$\begin{aligned} p(\rho, T) &= p_1(\rho) + p_2(\rho, T) + p_s(\rho, T), \\ \varepsilon(\rho, T) &= \varepsilon_1(\rho) + \varepsilon_2(\rho, T) + \varepsilon_s(\rho, T), \end{aligned} \quad (1)$$

где $p_1(\rho)$ и $\varepsilon_1(\rho)$ – холодный или упругий член, представляющий конденсированную плотность, скорость звука в конденсированном веществе и энергию сублимации и представляющийся в виде

$$\begin{aligned} p_1 &= p_0(\delta^n - \delta^m), \\ \varepsilon_1 &= (p_0 / \rho_0)[\delta^{n-1} / (n-1) - \delta^{m-1} / (m-1) - 1 / (n-1) + 1 / (m-1)] \end{aligned} \quad (2)$$

($\delta = \rho / \rho_0$, ρ_0 – конденсированная плотность, степени n и m для металлов находятся в диапазоне $n = 3 \div 3.5$, $m = 2 \div 2.5$);

$p_s(\rho, T)$ и $\varepsilon_s(\rho, T)$ – горячий член, совпадающий с УрС-ом Саха для многократно ионизованной плазмы [10] (который определяет УрС для высоких температур или малых плотностей), представляющийся в виде¹

$$\begin{aligned} p_s &= (9.65 / A) \rho(2+z)T, \\ \varepsilon_s &= (9.65 / A) \cdot [1.5(2+z)T + Q(z)] \end{aligned}$$

(A – атомный вес; z определяется приближенным способом решения уравнения Саха для многократной ионизации [10] с помощью трансцендентного уравнения $I(z+0.5) = T \ln(317AT^{3/2} / (z\rho))$; $I(z)$ – потенциалы ионизации; $Q(z)$ – затраты на ионизацию

$$Q(z) = \sum_1^z I(z);$$

$p_2(\rho, T)$ и $\varepsilon_2(\rho, T)$ – решеточный член, который вносит вклад в удельную теплоемкость конденсированного вещества и уменьшается при высоких температурах или низких плотностях в плазменной области, представляющийся в виде

$$\begin{aligned} \varepsilon_2 &= BT^{3/4} \delta^{5/6}, \\ p_2 &= (10/3) \varepsilon_2 \rho. \end{aligned} \quad (3)$$

Первый и третий член УрС-а (1) точно удовлетворяют термодинамическому тождеству

$$T \left. \frac{\partial p}{\partial T} \right|_V - p - \left. \frac{\partial \varepsilon}{\partial V} \right|_T = 0,$$

так что ошибка в соблюдении этого тождества определяется только уравнением Саха и должна быть мала.

Энергия сублимации ε_0 и квадрат холодной скорости звука c^2 для УрС-а (1) определяются только упругим вкладом (2) и по порядку величины равны между собой

$$\begin{aligned} \varepsilon_0 &= (p_0 / \rho_0)[1 / (n-1) - 1 / (m-1)], \\ c^2 &= (n-m)(p_0 / \rho_0). \end{aligned}$$

Однако для пластиков это не так. Скорости звука в них довольно малы, а для того, чтобы их сложные молекулы разделить на атомы, нужно затратить довольно большую энергию химической связи. Предположим для полистирола упругий вклад в виде

$$\begin{aligned} p_1 &= 0.002 \rho_0 (\delta^{1.95} - \delta^{1.6}), \\ \varepsilon_1 &= 0.002 (\delta^{0.95} / 0.95 - \delta^{0.6} / 0.6 + 0.614), \end{aligned} \quad (4)$$

конденсированная плотность полистирола равна $\rho_0 = 1 \text{ г/см}^3$. Тогда скорость звука будет 2.65 км/с (более или менее разумно), а энергия сублимации будет равна 12.3 кДж/г (из-за низких степеней в (4) основной вклад в холодную энергию будут вносить малые плотности). Однако энергия химической связи стирола (энергия атомизации) составляет [12] ~70 кДж/г. Для того, чтобы описывать УрС полистирола (и аналогично для других пластиков), необходимо учесть добавочные затраты энергии в размере $\varepsilon_D^{(0)} \sim 70 - 12 \approx 58 \text{ кДж/г}$. Можно предположить, что главным фактором, разрушающим молекулы (аналогично диссоциации), является температура, и добавить в (1) член с

¹ Здесь и далее используем систему см, г, 10⁻⁷с, температура в кэВ.

энергией $\varepsilon_D(T)$, зависящий только от температуры. Поскольку разрушение молекул должно происходить в электронвольтной области температур, мы предположили, что $\varepsilon_D(T)$ для полистирола находится по формуле

$$\varepsilon_D(T) = \varepsilon_D^{(0)} \frac{T - 0.00005}{T + 0.00085}$$

и имеет вид, показанный на рис. 1: предполагается, что разрушение молекул начинается с температуры 0.05 эВ и с ростом температуры стремится к значению $\varepsilon_D^{(0)}$.

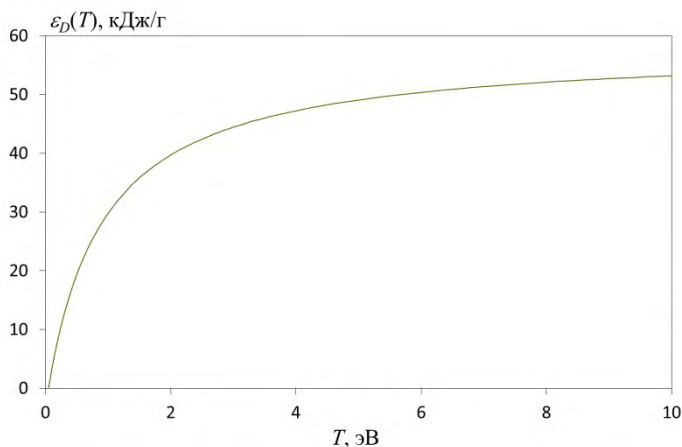


Рисунок 1. Зависимость $\varepsilon_D(T)$ для полистирола при $\varepsilon_D^{(0)} = 58$ кДж/г

Холодную часть УрС-а предполагаем в виде (4), коэффициент B в (3) считаем равным $B = 0.2$, а для уравнения Саха расчеты будем проводить по формулам многократной ионизации [10] отдельно для водорода Н и отдельно для углерода С (химический состав полистирола – СН), полагая равными их средние потенциалы ионизации $I_H(z+0.5, T) = I_C(z+0.5, T)$.

2. Ударная адиабата

В начальном состоянии пористого материала, в соответствии с [10], считается

$$p = 0, \quad \varepsilon = 0. \quad (5)$$

Оно буквально не соответствует УрС-у (4), но в пористом материале вещество состоит из кусочков конденсированного вещества, разделенных порами, а для каждой из этих фракций это условие выполняется.

Результаты расчетов ударной адиабаты для уравнения состояния (1) для полистирола с добавкой $\varepsilon_D(T)$, приведенной на рис. 1, и начальным состоянием (5) представлены на рис. 2. Начальная плотность полистирола принималась равной $\rho_1 = 0.1$ г/см³.

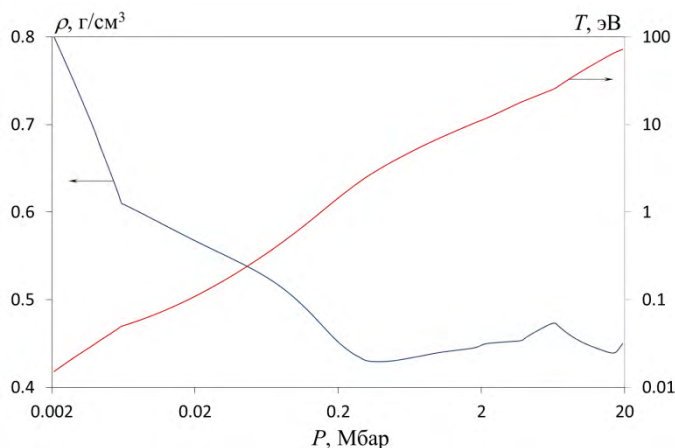


Рисунок 2. Зависимости температуры и плотности от давления для ударной адиабаты полистирола

На рис. 3 приведена зависимость $P(\rho/\rho_1)$ в сравнении с экспериментальными данными [9, 13], а также с результатами расчетов с использованием уравнений состояния SESAME и CALEOS, приведенными в [9].

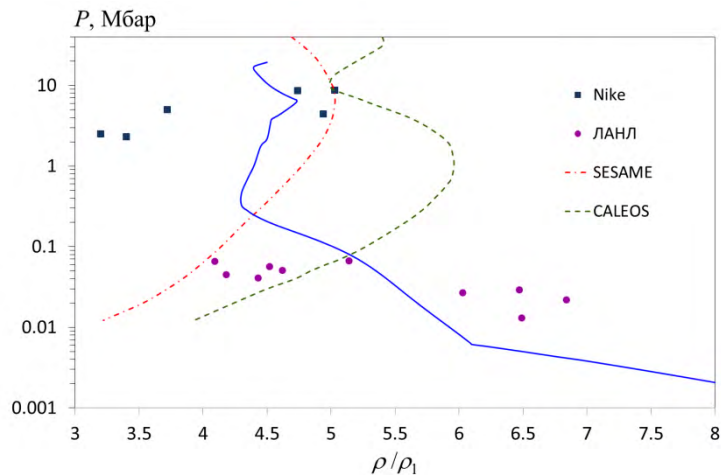


Рисунок 3. Зависимость $P(\rho/\rho_1)$ (сплошная линия) в сравнении с экспериментальными и расчетными данными [9, 13]

Из рисунков 2 и 3 видно, что полученная ударная адиабата ведет себя более разумно, чем ударные адиабаты, полученные с помощью моделей УрС-ов SESAME и CALEOS, и качественно согласуется с экспериментальными данными [9] и [13]. В частности, в отличие от ударных адиабат SESAME и CALEOS, виден поворот при низких давлениях (<100 кбар) к конденсированной плотности $\rho/\rho_1 = 10$. Экспериментальные точки ЛАНЛ [13] также указывают на такой поворот. Некоторой мерой качественного соответствия экспериментальных и расчетных ударных адиабат может служить среднеквадратичное отклонение расчетных значений ρ/ρ_1 от экспериментальных при заданном давлении на ударной волне, которое составляет ~35% и ~32% для адиабат SESAME и CALEOS соответственно, а для полученной нами адиабаты эта величина равна ~19%.

Согласие расчетов SESAME и CALEOS с экспериментальными результатами [9] в области более высоких давлений (~ 9 Мбар) оказывается лучшим, чем в области более низких давлений ~ 2 Мбар. Возможно, это связано с тем, что для больших давлений состояние вещества за фронтом является более однородным, поэтому лучше соответствует расчетам по моделям. Представляется, что для экспериментов [9] основной механизм гомогенизации начального неоднородного состояния пены – электронная теплопроводность, которая выравнивает температуру, а, следовательно, и плотность, поскольку давление выравнивается гидродинамически быстро. Некоторую роль в начальном размещивании вещества может играть турбулентность, но она должна быстро затухнуть за фронтом. Итак, оценки электронной теплопроводности за фронтом ударной волны с давлением ~ 2 Мбар (плотность ~ 0.5 г/см³, температура ~ 10 эВ) ~ 5 см²/с, а для электронной теплопроводности за фронтом ударной волны с давлением ~ 9 Мбар (плотность ~ 0.5 г/см³, температура ~ 40 эВ) ~ 20 см²/с. Если размер начальных неоднородностей ~1 мкм, то время гомогенизации будет ~ 2 нс для 2 Мбар и ~ 0.5 нс для 9 Мбар. Эти времена сравнимы с временами лазерного импульса (~4 нс), и для больших давлений состояние за фронтом, вероятно, будет более однородным и, может быть, будет лучше соответствовать расчетам по моделям.

3. Границы теплового плотного вещества

На рис. 4 показана полученная в расчетах ударной адиабаты полистирола зависимость температуры вещества от его массовой скорости.

Поскольку плотность вещества при ударном сжатии соответствует области ТПВ, из рис. 4 видно, что вещество за фронтом волны находится в состоянии ТПВ ($1 < T < 50$ эВ) при массовой скорости, находящейся в пределах от 11 км/с до 100 км/с. Указанный диапазон температур

соответствует давлениям 0.16 – 12 Мбар (см. рис. 2). Такие скорости можно получать в электрофизических и лазерных экспериментах, поэтому возможно изучение ТПВ в экспериментах по генерации ударных волн в малоплотном пористом веществе.

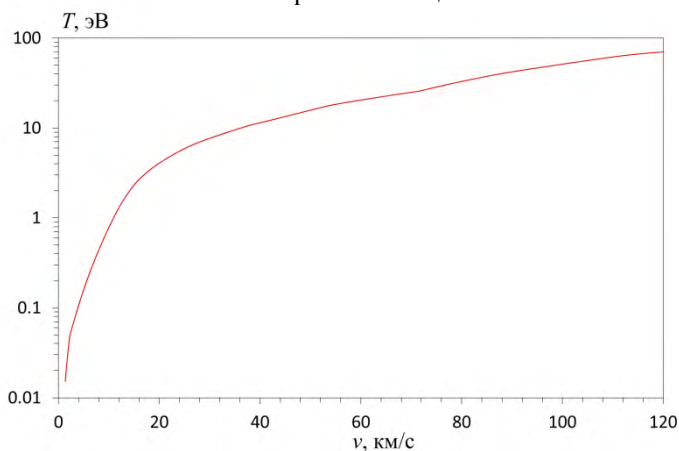


Рисунок 4. Зависимость температуры от массовой скорости вещества для ударной адиабаты полистирола

Заключение

При использовании трехчленного УрС-а для пористого пластика с учетом затрат энергии на разрушение химических связей построена ударная адиабата для пенистого полистирола. На основании проведенных расчетов можно сделать следующие выводы.

Полученная ударная адиабата ведет себя более разумно, чем ударные адиабаты, найденные с помощью моделей УрС-ов SESAME и CALEOS, и качественно согласуется с экспериментальными данными.

Определен диапазон ударной адиабаты для пористого материала, в котором вещество будет находиться в состоянии ТПВ. Он соответствует давлению 0.16 – 12 Мбар и массовой скорости вещества 11 – 100 км/с. Зная этот диапазон, можно планировать эксперименты с электрофизическими и лазерными драйверами для исследования ТПВ.

Список литературы

1. R. E. Reinovsky, Warm Dense Matter: Another application for pulsed power hydrodynamics, Dig. Tech. Papers, XVII IEEE Int. Pulsed Power Conf., Washington, DC, USA, 2009, p. 203-208.
2. T. Sasaki, T. Kikuchi, M. Nakajima, et al., Tamped target for Warm Dense Matter experiments using intense heavy ion beams // J. Phys., 2008, v. 112, p. 042027(4).
3. С. В. Лебедев, О возможности создания плазмы при электровзрыве проволочек // ТВТ, 1968, т. 6, с. 50.
4. G. R. Gathers, J. W. Shaner, R. L. Brier, Improved apparatus for thermophysics measurements on liquid metals up to 8000K // Rev. Sci. Instrum., 1976, v. 47, № 4, p. 471.
5. J. E. Bailey, M. D. Knudson, A. L. Carlson, et al., Time-resolved optical spectroscopy measurements of shocked liquid deuterium // Phys. Rev. B., 2008, v. 78, p. 144107(17).
6. А. М. Буйко, С. Ф. Гаранин, Ю. Н. Горбачев, et al., Explosive magnetic liner devices to produce shock pressures up to 3 TPa, Dig. Tech. Papers, XVII IEEE Int. Pulsed Power Conf., Washington, DC, USA, 2009, p. 215-220.
7. V. N. Korobenko, A. D. Rakhel, Electrical resistivity and equation of state measurements on hot expanded aluminum in the metal-nonmetal transition range // Phys. Rev. B, 2007, v. 75, p. 064208.
8. С. Ф. Гаранин, С. Д. Кузнецов, Р. Е. Рейновски, Исследование возможности использования установки PHELIX для получения теплого плотного вещества при электровзрыве алюминиевой и медной фольги // ПМТФ, 2015, т. 56, № 1, с. 17-23.
9. Y. Aglitskiy, A. L. Velikovich, et al., Absolute Hugoniot measurements for CH foams in the 2–9 Mbar range // Physics of Plasmas, 2018, v. 25, p. 032705(13).

10. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер, Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений // М.: Наука, 1966, 687с.
11. С. Ф. Гаранин, Физические процессы в системах МАГО-МТФ // Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2012, 343 с.
12. NIST. CCCBDB Atomization Energies, see <https://cccbdb.nist.gov/ea1.asp>.
13. *LASL Shock Hugoniot Data*, edited by S. P. Marsh // University of California Press, Berkeley/Los Angeles, California, 1980.

УЗЕЛ ОТКЛЮЧЕНИЯ ДИСКОВОГО ВЗРЫВОМАГНИТНОГО ГЕНЕРАТОРА ОТ СПИРАЛЬНОГО

Б.Е. Гриневич, Н.И. Ситникова, К.Н. Климущкин, К.С.Торопов

РФЯЦ – ВНИИЭФ, Саров, Россия

Рассмотрены два варианта устройств отключения дискового взрывомагнитного генератора от спирального. Оба варианта не предусматривают наличия электродетонаторов для подрыва устройств и срабатывают автоматически при окончании работы спирального генератора. Описаны принцип действия и конструкция устройства отключения. Представлены результаты моделирования и экспериментов по модернизации стандартного устройства отключения.

Ключевые слова: взрывчатое вещество, спиральный взрывомагнитный генератор, дисковый взрывомагнитный генератор, узел отключения,

Введение. Дисковые взрывомагнитные генераторы (ДВМГ) представляют собой компактные источники электромагнитной энергии с энергозапасом в десятки и сотни мегаджоулей. ДВМГ предназначены для изучения свойств веществ и моделирования физических процессов, происходящих при высоких плотностях энергии [1, 2]. Коэффициент усиления энергии ДВМГ невелик и, как правило, не превышает двадцати [3]. Начальная энергии в ДВМГ вводится с помощью спиральных взрывомагнитных генераторов (СВМГ), коэффициент усиления энергии которых может достигать до тысячи и более [4]. Начальный магнитный поток в СВМГ вводится с помощью конденсаторной батареи. Для того, чтобы максимум энергии ДВМГ поступал в нагрузку, в момент начала работы дискового генератора с помощью специального устройства производится замыкание электрической цепи между спиральным и дисковым генераторами [5]. Это устройство получило название узла отключения (УО).

Конструкция стандартного узла отключения. В целом, конструкция узла отключения была отработана в начале 70-х годов прошлого века и с тех пор не подвергалась изменениям [6]. Конструкция используемого ранее в экспериментах УО ДВМГ от СВМГ, схематично представлена на рис. 1.

Система инициирования заряда 6, состоит из равномерно расположенных по окружности взрывных линий задержки и такого же количества последовательно соединенных электродетонаторов (ЭД). При срабатывании ЭД системы инициирования заряда происходит инициирование детонации в цилиндрическом заряде взрывчатого вещества ВВ 4, с последующим разгоном медного цилиндра-лайнера 3. Лайнер 3 вытесняет лавсановый изолятор 2 в канавки треугольного сечения с углом при вершине ~ 60°, проточенные продольно по образующей на поверхности медного цилиндра 1 и замыкает контур.

Недостатками данной конструкции являются: наличие большого числа ЭД, применение которых может привести в несанкционированному подрыву, связанному с возникновением