

УДК 534.222.2

## ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ УДАРНО-СЖАТОЙ ЭМУЛЬСИОННОЙ МАТРИЦЫ

В. В. Сильвестров, С. А. Бордзиловский, М. А. Гулевич,  
С. М. Караханов, В. В. Пай, А. В. Пластинин

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, karakhanov@hydro.nsc.ru

Для измерения температуры ударного сжатия обратной эмульсии на основе водного раствора аммиачной и натриевой селитры применены две экспериментальные методики: планарная термомпара в диапазоне давления  $3.4 \div 12$  ГПа и метод оптической пирометрии в диапазоне  $9 \div 22$  ГПа. Экспериментальные данные, полученные при помощи термомпары, согласуются с расчетными. Результаты оптических измерений существенно превышают данные расчета и указывают на наличие объемно-неоднородного температурного поля за фронтом ударной волны в эмульсии, обусловленного структурной неоднородностью исследуемой среды.

Ключевые слова: эмульсионная матрица, температура ударного сжатия, оптическая пирометрия, планарная термомпара, структурная неоднородность.

DOI 10.15372/FGV20160216

### ВВЕДЕНИЕ

Основу любого эмульсионного взрывчатого вещества (ЭМВВ) составляет обратная эмульсия типа вода в масле — жидкая или пастообразная композиция плотностью  $1.35 \div 1.45$  г/см<sup>3</sup> в зависимости от состава. Эмульсионная матрица (эмульсия) — важнейший и единственный компонент ЭМВВ, способный к экзотермическому превращению. Ее количество (по массе) в составе ЭМВВ может достигать  $99.0 \div 99.5$  %. Для понимания возможности и механизма взрывного превращения эмульсии за фронтом детонационной волны представляет интерес измерение температуры ударного сжатия эмульсии в широком диапазоне давлений, характерных для ЭМВВ.

До настоящего времени существовали только расчетные оценки температуры ударного сжатия инертной эмульсии:  $350 \div 630$  К при давлении  $2 \div 10$  ГПа [1] и  $300 \div 2500$  К при давлении  $1 \div 40$  ГПа [2]. Для анализа достоверности этих оценок необходимо провести измерения температуры ударно-сжатой эмуль-

сии. Результаты могут быть использованы для оценки корректности выбора моделей и параметров уравнения состояния, значений теплоемкости для исследуемой эмульсии в условиях, характерных для детонации ЭМВВ.

### 1. СТРУКТУРА ЭМУЛЬСИОННОЙ МАТРИЦЫ

Обратная эмульсия состоит из двух основных составляющих: перенасыщенного водного раствора окислителя и горючего (включая эмульгатор) в массовом соотношении примерно  $94/6$  %. С физической точки зрения высококачественная эмульсия — мутноватая, частично прозрачная, структурно-неоднородная среда, состоящая из дискретной фазы, капель водного раствора окислителя (размер частиц менее  $1 \div 2$  мкм, плотность  $\rho_0 \approx 1.4 \div 1.55$  г/см<sup>3</sup>) и непрерывной фазы, тонких прослоек горючего (характерная толщина  $0.1 \div 0.2$  мкм,  $\rho \approx 0.9$  г/см<sup>3</sup>).

За фронтом ударной волны (УВ) из-за разной ударной сжимаемости компонентов происходят дробление капель окислителя и интенсивное перемешивание дискретной и непрерывной фаз. В областях контакта фаз за счет неоднородностей гидродинамического течения и внутреннего трения могут образоваться области перегрева, своеобразные горячие точки даже в кажущейся квазиоднородной инертной среде.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 12-08-00092-а, 13-03-00791-а), программы Президиума РАН № 2.9 и фонда Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (НШ-2695.2014.1).

© Сильвестров В. В., Бордзиловский С. А., Гулевич М. А., Караханов С. М., Пай В. В., Пластинин А. В., 2016.



Рис. 1. Гидродинамическая картина разрушения структуры эмульсии за фронтом ударной волны амплитудой 20 ГПа (двумерная модель):

ударная волна распространяется слева направо, фронт волны отмечен стрелкой

Эти качественные соображения иллюстрирует рис. 1, на котором приведена модельная картина разрушения смеси капель окислителя с горючим\*. Капли окислителя представлены светло-серыми шестиугольниками перед фронтом УВ, а материал окислителя за фронтом УВ — черным цветом. Тонкие прослойки горючего выделены темно-серым цветом перед фронтом и белым — за фронтом. На расстоянии, равном 5–7 размерам капель окислителя, наблюдается разрушение исходной структуры эмульсии и увеличение площади контакта окислителя с горючим. Расчетная температура горючего в локальных областях размером  $0.1 \div 1$  мкм в  $1.5 \div 2$  раза превышала температуру окислителя. При достаточно интенсивной УВ в этих областях возможно инициирование экзотермической реакции частичного разложения эмульсии.

Кроме того, эмульсия — среда с небольшой пористостью, обусловленной микроскопическими пузырьками воздуха, захваченного при изготовлении эмульсии путем механического смешивания раствора окислителя и жидкого горючего. При схлопывании этих «технологических» пор под действием УВ также могут формироваться температурные неоднородности. В результате непосредственно за фронтом УВ присутствуют микроскопические области с температурой локального разогрева ( $T_{HS}$ ) более высокой, чем температура эмульсии при ее ударном сжатии как однородной среды. Таким образом, за фронтом УВ в эмульсии может формироваться объемно-неоднородное температурное поле. Время существования локальных температурных неоднородностей определяется турбулентным тепло- и массопереносом за фронтом УВ. Например, для крупных пор, моделируе-

мых полыми микросферами из стекла размером 60 мкм в однородной среде, время их жизни составляет  $0.1 \div 0.7$  мкс в широком диапазоне давления  $p_s = 10 \div 30$  ГПа [4].

Вдали от фронта УВ температурные неоднородности нивелируются и среда может характеризоваться одной температурой, которая является температурой объемного ударного нагрева эмульсии  $T_i$  как однородной инертной среды, меньшей, чем температура локальных неоднородностей. Таким образом, результат измерения температуры эмульсии за фронтом УВ может зависеть от физического принципа, положенного в основу метода измерения, и от временного разрешения метода.

## 2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Исследовалась высокодисперсная эмульсионная матрица: окислитель — водный раствор аммиачной и натриевой селитр, 94 %; горючее — смесь индустриального масла, парафина и эмульгатора, 6 %. Плотность эмульсии  $\rho_0 = 1.40 \pm 0.01$  г/см<sup>3</sup>, размер капель окислителя менее 2 мкм, кислородный баланс близок к нулю. В координатах волновая ( $u_s$ ) — массовая ( $u_p$ ) скорость ударная адиабата эмульсии в диапазоне давления  $0.5 \div 37.5$  ГПа хорошо описывается обобщенным соотношением  $u_s/c_0 = 1.37 - 0.37 \exp(-2u_p/c_0) + 1.62u_p/c_0$  при измеренной скорости звука  $c_0 = 1.85 \pm 0.05$  км/с [2].

Температуру ударно-сжатой среды измеряли двумя известными методами: фотоэлектрическая пирометрия в оптическом диапазоне [5] и термпарный метод [6, 7]. Для проведения оптических измерений слой эмульсии толщиной 5 мм и диаметром 90 мм нагружали через 4-миллиметровый дюралюминиевый экран ударом дюралюминиевых пластин диаметром 80 мм и толщиной 10 или 8 мм, ускоренных

\*Расчет выполнил А. С. Юношев при помощи кода ЭГИДА-2D [3].

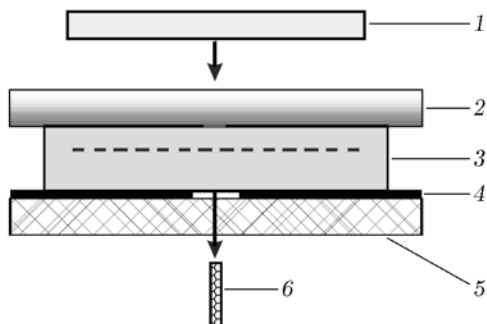


Рис. 2. Схема оптических измерений ударной температуры эмульсии:

1 — ударник или накладной заряд ВВ, 2 — экран из дюралюминия, 3 — образец эмульсии, 4 — диафрагма, 5 — плексиглас, 6 — оптоволокну, штриховая линия — фронт УВ

до 2.4 и 3.5 км/с соответственно, или взрывом накладного заряда гексогена диаметром 80 и высотой 200 мм через экран из фторопласта толщиной 8 мм (рис. 2). Параметры импульса давления, создаваемого накладным зарядом: амплитуда, временной профиль и длительность, определяли при помощи манганиновых датчиков давления. Первый датчик располагали между двумя пластинами фторопласта (экран) толщиной 4 мм каждая, перед входом в эмульсию, второй датчик — на выходе из эмульсии во фторопласт.

При нагружении эмульсии накладными

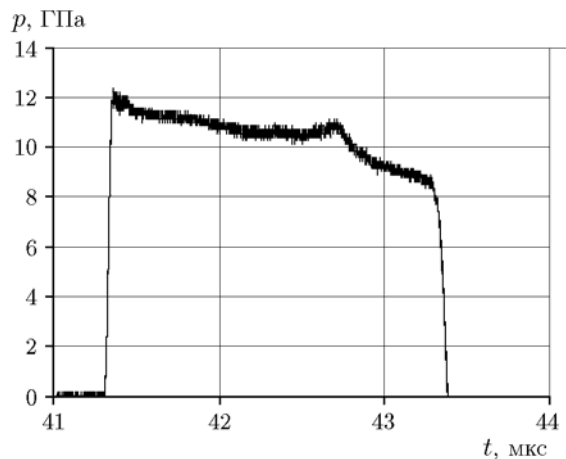


Рис. 3. Профиль давления:

датчик помещен между 4-миллиметровыми пластинами фторопласта перед входом в эмульсию, заряд — насыщенный гексоген

зарядами насыщенных взрывчатых веществ (ВВ) указанных размеров на входе в образец генерируются достаточно плоские импульсы давления длительностью не менее 2 мкс (рис. 3). Пересчет пикового показания манганинового датчика, расположенного в экране, по ударным адиабатам фторопласта и эмульсии дает значение 9.7 ГПа.

Через диафрагму с отверстием диаметром 6 мм и окно из плексигласа излучение ударно-сжатой эмульсии выводилось из взрывной камеры при помощи оптоволокну длиной до 12 м и попадало через светофильтры на входы фотомножителей. Измерительный тракт, начиная от диафрагмы, калибровался перед каждым опытом при помощи эталонной лампы в диапазоне температуры  $T = 1\,200 \div 2\,300$  К. Погрешность измерения температуры оценивалась в 8 %, временное разрешение оптического тракта в целом составляло 25 нс. Момент входа УВ в эмульсию фиксировался при помощи отметчика времени из пьезоэлектрической пленки. Параметры импульса давления в эмульсии (амплитуда, длительность, скорость УВ) рассчитывались методом  $p-u_p$ - и  $x-t$ -диаграмм по скорости ударника.

Для термометрических измерений использовалась батарея из трех последовательно соединенных планарных термопар, устанавливае-

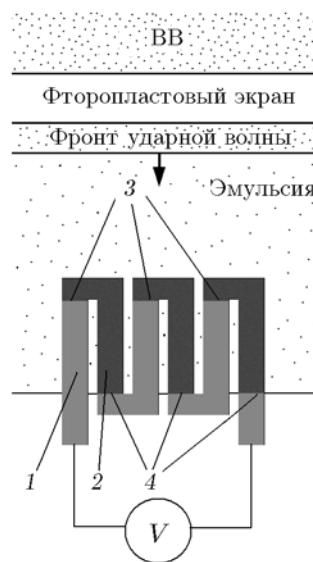


Рис. 4. Схема измерения ударной температуры планарной термопарой, расположенной в исследуемой среде:

1 — трехслойная часть, 2 — монометаллическая часть, 3 — «горячие» спаи, 4 — «холодные» спаи

мая в ударно-сжатой эмульсии перпендикулярно фронту УВ (рис. 4). Ударная волна в эмульсионной матрице формировалась взрывом накладного заряда ВВ. Между ВВ и эмульсией размещался 8-миллиметровый экран из фторопласта. С целью варьирования давления в эмульсии в диапазоне  $3.4 \div 12$  ГПа использовались заряды насыпной плотности диаметром 78 мм и длиной 200 мм из аммонита 6ЖВ, его смеси с тальком, гексогена и сплава тротил — гексоген 50/50. Каждая термопара состояла из монометаллической (константановой) и трехслойной (медь — константан — медь) частей (темного и серого цвета на рис. 4). «Горячими» и «холодными» спаями термопары являются места сочленения монометаллической и трехслойной частей. Для изготовления термопар на поверхность фольги из константана толщиной 185 мкм электролитическим методом с обеих сторон наносился слой меди толщиной  $2.5 \div 3.5$  мкм. Фольга играла роль несущего каркаса, предохраняющего тонкий медный слой от неконтролируемой деформации и разрушения. При таком расположении исследуемая среда движется вдоль поверхности термопары, обеспечивая конвективный теплообмен с поверхностными чувствительными слоями термопар. Поперечные размеры термопары — ширина 20 мм, высота 16 мм. Расстояние между «горячим» и «холодным» спаями  $\approx 16$  мм определяло время регистрации температуры.

Численное решение задачи теплопроводности [6] показало, что после того, как внешняя поверхность медного слоя нагревается до температуры окружающей среды, неоднородность распределения температуры по толщине медного слоя через 0.3 мкс не превышает 5 %. В результате теплообмена температура границы медь — константан монотонно растет со временем, асимптотически приближаясь к температуре окружающей среды. Величина генерируемой термоэлектрической движущей силы (термоЭДС) зависит от термоэлектрического коэффициента термопары медь/константан, его зависимости от температуры [8], толщины микрослоев меди и зависимости проводимости меди от давления из [7]. Поскольку толщины медных слоев в разных термопареях заметно различались ( $2.5 \div 3.5$  мкм), каждую термопару перед экспериментом индивидуально тарировали при температуре  $100$  °С. Эффективное значение термоэлектрического коэффици-

ента для используемых термопар составляло  $16 \div 20$  мкВ/К. Процедура восстановления значения скачка температуры  $\Delta T = T - T_0$  исследуемой среды за фронтом УВ относительно исходной  $T_0 \approx 290$  К по максимуму регистрируемой термоЭДС приведена в [6]. Погрешность измерения  $\Delta T$  исследуемой эмульсии составляла около 10 % [9].

В опытах с термопарой, ввиду очевидно меньшего временного разрешения этого метода по сравнению с оптическим, толщина слоя эмульсии была увеличена до 30 мм при диаметре образца 70 мм. Предполагалось, что в течение всего времени измерения термопара находится в области постоянных параметров, давления и температуры. «Горячий» спай термопары расположен на расстоянии  $\Delta x = 12 \div 17$  мм от поверхности фторопластового экрана, что обеспечивало достаточное время регистрации, определяемое моментами касания «горячего» спая фронтом УВ, движущейся со скоростью  $u_s$ , и удара экрана, движущегося с массовой скоростью  $u_p$ , по торцу термопары.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Временные профили термоЭДС, зарегистрированные в двух опытах, приведены на рис. 5. Видно, что амплитуда сигнала рас-

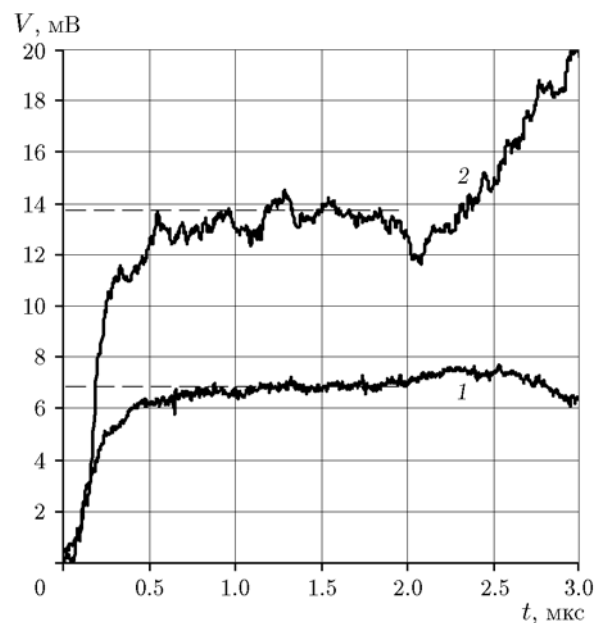


Рис. 5. Осциллограммы сигналов с термопар: 1 — 4.6 ГПа,  $\Delta T = 125$  К, 2 — 8.2 ГПа,  $\Delta T = 255$  К

тет при повышении давления ударного сжатия. Значения скачка температуры  $\Delta T = T - T_0$  при  $T_0 \approx 290$  К определялись по уровням сигналов, отмеченных штриховой линией на рис. 5. Момент времени  $t = 2$  мкс, после которого наблюдается повторный рост сигнала, соответствует приходу второй УВ, связанной с наличием фторопластового экрана. При входе УВ в эмульсию всегда регистрируется небольшая электрическая помеха, вызванная, по-видимому, действием УВ на полярные капли окислителя. По разнице между временем  $\Delta t$  появления этой помехи и началом сигнала термоЭДС в каждом опыте определялась скорость УВ в эмульсии  $u_s = \Delta x / \Delta t$ , удовлетворительно совпадающая с оценкой по методу ударных поляризации и адиабате эмульсии. Как отмечалось в [10, 11], обтекание термопары высокоскоростным потоком вещества за фронтом УВ в условиях высокого динамического давления значительно ускоряет выравнивание температуры «горячего» спая и температуры окружающей среды за счет, по-видимому, конвективного турбулентного теплообмена. Время достижения максимума термоЭДС составляло  $0.7 \div 1.2$  мкс, что на шесть порядков меньше расчетного времени теплообмена термопары с исследуемой средой при отсутствии

конвективного движения. В диапазоне давления  $3.4 \div 12$  ГПа результаты измерения термопарой  $360 \div 755$  К согласуются с расчетом (рис. 6), что подтверждает достоверность расчета ударной температуры по уравнению состояния эмульсионной матрицы, предложенному в [2].

Оптически измеренные профили температуры эмульсии  $T(t)$  в диапазоне давления  $13 \div 20$  ГПа близки к аналогичным профилям для однородных сред (рис. 7). Передний фронт профиля связан с частичной прозрачностью чистой эмульсии. В течение 250 нс формируется оптически толстый излучающий слой толщиной около 1 мм. Температура матрицы оценивалась по уровню сигнала (штриховые линии на рис. 7). Незначительное увеличение амплитуды оптических сигналов после достижения первого максимума связано с уменьшением толщины слоя эмульсии перед фронтом УВ и соответствующим снижением поглощения излучения фронта. В моменты выхода УВ на границу эмульсия/плексиглас (вертикальные стрелки на рис. 7) формируется волна разгрузки, при этом эффективная температура падает.

Обратим внимание на разную форму профилей регистрируемой температуры  $T(t)$  ударно-сжатой чистой эмульсии (см. рис. 7) и детонирующего ЭмВВ (рис. 2 в [12]). Характерный для ЭмВВ температурный «всплеск»,

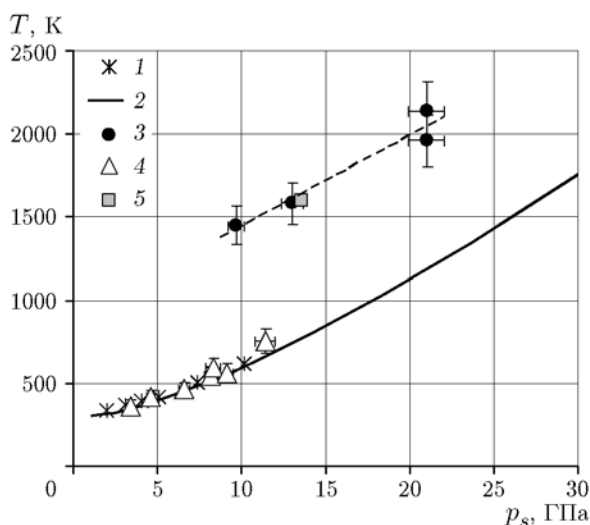


Рис. 6. Температура ударного сжатия эмульсии на основе аммиачной и натриевой селитры в зависимости от давления:

расчет (без реакции): 1 — [1], 2 — [2]; эксперимент: 3 — пирометр, 4 — термопара, 5 — точка Чепмена — Жуге для эмульсии без микробаллонов (расчет [14])

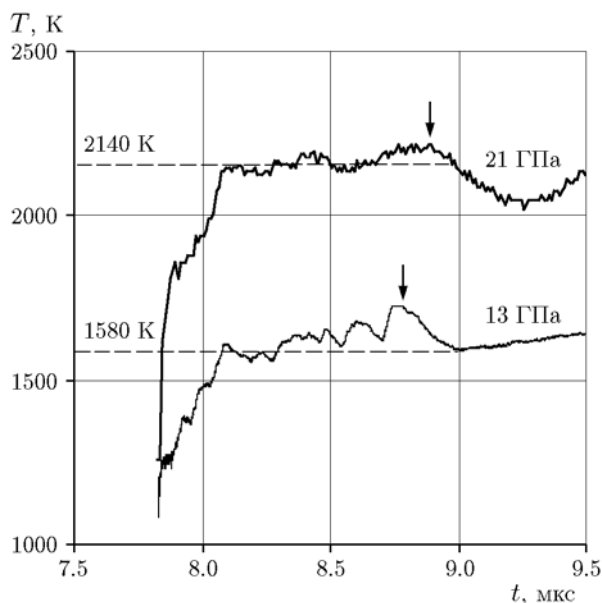


Рис. 7. Пирометрические профили температуры

Результаты измерения температуры ударно-сжатой эмульсионной матрицы

Номер опыта	Нагружение	$\rho_{0ВВ}$ , г/см <sup>3</sup>	$u_s$ , км/с	$p_s$ , ГПа	$T_{HS}$ , К	$T_i$ , К	$T_i(p_s)$ , К (расчет [2])
Оптические измерения							
1	Гексоген	—	—	9.7	1 450	—	—
2	Ударник, 2.4 км/с	—	—	13*	1 580	—	730
3	Ударник, 3.5 км/с	—	—	21*	1 960	—	1 180
4	Ударник, 3.5 км/с	—	—	21*	2 140	—	1 180
Термопарные измерения							
5	6ЖВ + тальк	$0.8 \pm 0.05$	3.26	3.4**	—	362	338
6	6ЖВ***	$1.0 \pm 0.02$	4.03	6.6**	—	463	441
7	6ЖВ***	$1.0 \pm 0.02$	3.7	4.6**	—	415	—
8	Гексоген***	$1.02 \pm 0.02$	4.6	9.1**	—	569	546
			4.44	8.2**	—	545	546
			4.47	8.3**	—	595	546
9	ТГ 50/50	1.65	5.0	11.4**	—	755	730

\* Давление рассчитано по скорости ударника.

\*\* Давление рассчитано по скорости УВ в эмульсии.

\*\*\* Разные давления для одинаковых ВВ обусловлены небольшими отличиями начальной плотности и влажности и погрешностью измерения скорости УВ.

связанный с формированием горячих точек из-за наличия искусственно введенного порообразующего сенсibilизатора (стеклянные микробаллоны), в случае чистой эмульсии отсутствует. Это указывает на отсутствие горячих точек, обеспечивающих детонацию эмульсии.

Вклад объемного разогрева эмульсии в интегральное свечение фронта УВ в эмульсии несуществен, ввиду малого значения объемной температуры (по расчету при 13 ГПа  $T_i \approx 750$  К). Оптический метод с глубины до 1 мм регистрирует более горячие неоднородности с температурой около 1 600 К и выше, более холодную матрицу он просто «не видит».

Отметим, что при давлении 12 ГПа расчетная температура ударного сжатия дизельного топлива составляет 1 500 К [13], а это вещество часто используется в качестве углеводородного горючего, в том числе и в ЭМВВ. Измеренная яркостная температура горячих неоднородностей при давлении 13 ГПа составляет  $\approx 1 600$  К. Близость указанных величин является, возможно, намеком на то, что основным источником горячих неоднородностей выступают области нагретого горючего с характерным, оптически неразличимым размером порядка 0.1 мкм. Полученные результаты пред-

ставлены в таблице.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интерпретация результатов измерения температуры ударно-сжатой эмульсионной матрицы оказалась сложной задачей. Два метода измерения привели к различным результатам. При давлении 9.7 и 21 ГПа в падающей УВ при помощи оптического пирометра зарегистрирована температура 1 450 и 2 140 К соответственно (см. рис. 6), примерно в два раза превышающая значения 730 и 1 180 К, рассчитанные по разработанному ранее уравнению состояния для чистой эмульсии [2]. В то же время измеренные термопарным методом при давлении 3.4 ÷ 12 ГПа значения температуры 360 ÷ 755 К хорошо согласуются с результатами расчета [2].

Как подробно рассмотрено в п. 1 настоящей работы, различие значений температуры, измеряемой двумя методами, основанными на разных физических принципах, связано с возникновением в эмульсии неоднородного (вверх по потоку от фронта УВ) температурного поля. Основная причина появления температурной неоднородности — существенное различие

в плотностях, ударной сжимаемости и теплоемкостях компонентов обратной эмульсии — капель водного раствора окислителя и углеродородного горючего.

Более горячие неоднородности расположены вблизи ударного фронта и обусловлены большей температурой прослоек горючего. Время их жизни достаточно велико, но не выше  $0.5 \div 1$  мкс, что достаточно для формирования оптически толстого горячего слоя толщиной до 1 мм: при давлении выше 13 ГПа яркостная температура этого слоя около 1600 К. Именно эта температура и фиксируется оптическим методом, основанным на связи интенсивности свечения горячей среды с ее температурой. Термопарный метод ввиду особенности геометрии датчика и его инерционности измеряет эффективную температуру ударно-сжатой исследуемой среды на глубине, которую можно оценить приближенно как время прогрева термопары, умноженное на скорость УВ, —  $1.5 \text{ мкс} \cdot (4 \div 5) \text{ мм/мкс} = 6 \div 8 \text{ мм}$ .

Разное временное разрешение методов и ограниченное время жизни горячих точек обуславливают различие результатов, получаемых двумя методами, основанными на различных физических принципах: на регистрации интегральной светимости ударно-сжатого вещества и на теплообмене между средой и телом датчика. Но именно применение двух методов измерения температуры позволило зафиксировать объемно-неоднородное температурное поле в ударно-сжатой эмульсии, которое заранее предвидеть было трудно.

Отметим, что предположение о том, что в структурно-неоднородной среде возможно кратковременное появление температурной неоднородности за счет различия в ударной сжимаемости и теплофизических свойствах отдельных компонентов, высказывалось и ранее. Например, при численном анализе прохождения УВ по дуниту, двухкомпонентному металлическому сплаву (частицы вольфрама в медной матрице), утверждается, что различие температур компонентов может достигать  $20 \div 30$  % при ударном давлении  $30 \div 120$  ГПа [15]. Но, насколько известно авторам, экспериментальное доказательство существования подобной температурной неравновесности в совершенно иной структурно-неоднородной среде получено впервые, благодаря применению двух методов, основанных на различных физических принципах измерения температуры.

Авторы признательны А. С. Юношеву за выполнение модельного расчета и М. А. Федотенко за техническую помощь в работе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Cooper J., Leiper A. G., Neilson W. G. Molecular and microscopic structural effects in the detonation of fluid explosives // Proc. 12th Intern. Detonation Symp. — 2002. — P. 733–741.
2. Сильвестров В. В., Юношев А. С., Пластинин А. В., Рафейчик С. И. Ударная сжимаемость эмульсионной матрицы при давлении до 37 ГПа // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 4. — С. 110–116.
3. Код ЭГИДА 2-D для моделирования двумерных задач: учеб. пособие / под ред. Ю. В. Янилкина. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2008.
4. Бордзиловский С. А., Караханов С. М., Сильвестров В. В. Оптическое излучение ударно-сжатой эпоксидной смолы со стеклянными микросферами // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 3. — С. 105–112.
5. Бордзиловский С. А., Караханов С. М. Измерение температуры полиметилметакрилата при ударном сжатии // Вестн. НГУ. Сер. Физика. — 2011. — Т. 6, вып. 1. — С. 116–122.
6. Гулевич М. А., Пай В. В., Яковлев И. В., Хаустов С. В. Термопарный метод измерения температуры газообразных и жидких сред при их ударном сжатии // Изв. ВолгГТУ. — 2013. — № 7. — С. 14–17.
7. Гулевич М. А. Измерение электрической проводимости меди при импульсном нагружении // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 6. — С. 110–116.
8. Таблицы физических величин: справочник / под ред. И. К. Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976.
9. Гулевич М. А., Пай В. В., Яковлев И. В., Сильвестров В. В., Лысак В. И., Кузьмин С. В., Хаустов С. В. Измерение температуры жидких сред при ударном сжатии // Изв. ВолгГТУ. — 2014. — № 20. — С. 16–20.
10. Bloomquist D. D., Sheffield S. A. Shock-compression temperature rise in polymethylmethacrylate determined from resistivity of embedded copper foils // Appl. Phys. Lett. — 1981. — V. 38, N 3. — P. 185–187.
11. Bloomquist D. D., Sheffield S. A. Thermocouple temperature measurements in shock initiation PBX-9404 // Proc. 7th Symp. on Detonation. — 1981. — P. 1004–1009.
12. Сильвестров В. В., Бордзиловский С. А., Караханов С. М., Пластинин А. В. Температура детонационного фронта эмульсионного взрывчатого вещества // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 1. — С. 135–142.
13. Robbins D. L., Sheffield S. A., Dattelbaum D. M., Stahl D. B. Hugoniot and properties of diesel fuel used in ANFO // AIP

- Conf. Proc. 1426. — 2012. — P. 828. — DOI: 10.1063/1.3686406.
14. **Yoshida M., Iida M., Tanaka K., Fujiwara S.** Detonation behavior of emulsion explosives containing glass microballoons // Proc. 8th Symp. (Intern.) on Detonation. — 1985. — P. 993–1000.
15. **Гольшев А. А., Ким В. В., Емельянов А. Н., Молодец А. М.** Модель для расчета параметров ударного сжатия пластинчатой градиентной смеси // ПМТФ. — 2015. — Т. 56, № 4. — С. 92–100.

*Поступила в редакцию 15/IV 2015 г.*

---