

УДК 533.06.11

ОСОБЕННОСТИ РЕЛАКСАЦИИ СВЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГОРЯЧИХ ТОЧЕК В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ХАРАКТЕРИСТИК ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

С. А. Бордзиловский, С. М. Караханов, А. В. Пластинин

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

Исследовалось световое излучение образцов, представляющих собой прозрачную матрицу с включениями горячих точек. В качестве материала матрицы применялись вода и эпоксидная смола. Горячие точки генерировались при сжатии полых стеклянных микробаллонов МС-В ударной волной. В диапазоне давлений $0.7 \div 29$ ГПа зарегистрировано время затухания яркости от 280 до 70 нс. Время затухания яркости увеличивалось больше чем на порядок при замене оптического окна из твердой эпоксидной смолы на LiF. Тем не менее, даже такое увеличение времени затухания яркости намного меньше оценок температурной релаксации горячих точек за счет механизмов теплопроводности при расчете со стационарными параметрами ($t_a = 10^{-2}$ с) и за счет излучения ($\tau = 2.4 \cdot 10^{-3}$ с). Сделан вывод, что доминирующим механизмом температурной релаксации является турбулентное перемешивание среды за фронтом ударной волны. Результаты опытов показывают, что при численном моделировании температурного поля при прохождении поры ударной волной необходимо учитывать вязкость и прочность вещества матрицы.

Ключевые слова: ударные волны, микробаллоны, коллапс поры, горячие точки, вязкость, интенсивность излучения, температура горячей точки.

DOI 10.15372/FGV2022.9232

ВВЕДЕНИЕ

Конденсированные вещества, как правило, являются гетерогенными из-за наличия в них микронеоднородностей, природа возникновения которых и физическая форма различны. Это могут быть поры и полости в твердых веществах, пузырьки в жидкости, неоднородности плотности и т. д. Ударно-волновое нагружение таких гетерогенных веществ приводит к тому, что в местах расположения неоднородностей образуются локальные очаги с повышенной концентрацией энергии, так называемые горячие точки [1]. Температура этих очагов заметно выше, чем температура объемного разогрева вещества, в котором они находятся. Большая часть исследований о поведении неоднородностей при ударном нагружении посвящена коллапсу микропор. Это стимулировано той большой ролью, которую этот процесс играет в различных областях науки и техники: инициирование взрывчатых веществ (ВВ), проблемы разрушения деталей машин при кавитации, вопросы безопасного использования литотрипторов и т. д. Подробное изучение кол-

лапса пор, экспериментальное, теоретическое и путем математического моделирования, позволило выделить основные механизмы образования горячих точек.

При давлениях в несколько гигапаскалей и выше сжатие поры определяется в основном гидродинамическим течением, возникающим при прохождении ударной волны (УВ). При этом на верхней по направлению распространения ударной волны стенке полости формируется струя, затем происходит удар струи по нижней поверхности полости, вызывающей нагрев материала матрицы [2–6]. Экспериментально действие такого механизма подтверждено, например, в работе [2], где рассмотрен коллапс крупных полостей, наполненных воздухом и находящихся либо в желатиновом геле, либо в эмульсии на основе смеси аммиачной и натриевой селитры. К подобным выводам пришли и авторы работы [3] на основе анализа результатов скоростной видеосъемки, зарегистрировавшей образование высокоскоростной струи, ударяющей по противоположной стенке полости. Гидродинамика коллапса нескольких воздушных пузырьков размером 3 мм в желатине исследована в [6]. В этой работе также зафиксированы асимметричный коллапс пу-

зырька и образование внутренней струи. Кроме того, рассмотрено воздействие отдельных пузырьков друг на друга, что, по мнению авторов, представляет интерес не только для процессов инициирования ВВ, но также и в гидравлике и медицинской практике.

Взрывчатые вещества, используемые как в военных, так и в гражданских приложениях (твердые, жидкие, пастообразные), обычно гетерогенны. Наличие в них микронеоднородностей определяет возможность их инициирования, устойчивого распространения детонации, а также безопасного обращения. Именно введение в эмульсионную матрицу искусственных неоднородностей в виде стеклянных или полимерных микробаллонов, газовых пузырьков или ценосфер превращает ее в эмульсионное ВВ (ЭмВВ) [7]. Поэтому многие исследования, в которых определяются параметры, характеризующие процесс воздействия УВ на микронеоднородность, проводятся с точки зрения приложения к ВВ. В [8] численно моделировался процесс сжатия полости внутри вещества с характерными параметрами для типичного ВВ на основе октогена. Физический размер полости, моделируемый в расчетах, составлял 0.1 мм. Результаты расчетов показали, что по оси сферической и удлиненной полостей формируется струя, ударяющая по задней поверхности поры, что приводит к возникновению взрывных волн с высоким давлением, распространяющихся в противоположных направлениях.

При меньших давлениях (порядка 1 ГПа в зависимости от материала матрицы) возможно образование локального очага с высокой температурой в результате действия вязкопластического механизма [9–12]. Анализ вязкопластического разогрева материала, в котором находится пора, при ударном нагружении проведен в [9]. Авторы показали, что вязкопластический механизм может эффективно инициировать твердое конденсированное ВВ (в качестве которого для примера выбран тэн) при размере пор вплоть до ≈ 1 мкм. При давлении ≈ 2 ГПа температура в окрестности поры, достаточная для инициирования тэна, достигает $\approx 10^3$ К за время меньше чем 0.5 мкс. В работе [10] в качестве критерия реализации вязкого режима деформирования поры предложено использовать соотношение между характеристическим временем деформирования

$$t_\mu = 4\mu / (p_{sh} - p_\sigma) \quad (1)$$

и временем прохождения УВ через пору $t_p = \delta_0 / u_s$. Здесь p_{sh} , p_σ , μ — соответственно давление, предел прочности и вязкость ударно-сжатой среды, δ_0 — характерный размер пор в нагружаемом веществе, u_s — скорость УВ. Если $t_p \ll t_\mu$, то доминирует вязкопластический режим. Кроме того, в статье отмечается, что чем меньше интенсивность УВ, тем больше должен быть размер пор для эффективного разогрева.

Подробное экспериментальное исследование инициирования нитрометана при наличии или отсутствии в нем гелиевого пузырька выполнено в [13]. Видеосъемка сжатия пузырька в видимом и инфракрасном диапазонах с одновременной регистрацией спектра излучения показала, что пороговое давление УВ для инициирования реакции в нитрометане снижается с 10 ГПа при отсутствии пузырька до 1 ГПа при его наличии. Из экспериментально определенных параметров при коллапсе поры больше всего данных имеется по температуре. В [13] при давлении УВ ≈ 5 ГПа яркостная температура достигала $2.05 \cdot 10^3$ К. В [14] измерялась температура детонации промышленного ЭмВВ типа Nitram на основе водного раствора аммиачной селитры с добавкой 7 и 14 % алюминиевого порошка и без него. Плотность исследуемых композиций составляла 1.2 и 1.28 г/см³. В качестве оконного материала использовался плексиглас. Температура, как обычно, оценивалась по максимуму сигнала, регистрируемого фотоэлектрическим пирометром. Для ЭмВВ без алюминия получено значение $T_b = 4.18 \cdot 10^3$ К. Этот максимум температуры, по-видимому, следует ассоциировать с температурой горячих точек, возникших при сжатии стеклянных микробаллонов в ЭмВВ. Температуры такого же порядка по значениям зарегистрированы и в работе [15] при определении температуры детонации ЭмВВ. Температура горячих точек, оцениваемая по максимуму сигнала светимости, достигала $(2.5 \div 3.3) \cdot 10^3$ К в исследованном диапазоне давлений и росла при увеличении давления. В работе [16] проведен анализ амплитудно-временных характеристик светимости полых микробаллонов из стекла, размещенных в матрице из эпоксидной смолы, при ударном давлении $9 \div 29$ ГПа. В этой работе использовались те же микробаллоны, что и в опытах с исследованными выше ЭмВВ. Показано, что наличие искусственных пор приводит

к температурному всплеску до $(3.2 \div 3.5) \cdot 10^3$ К на фоне температуры ударно-сжатой эпоксидной смолы (матрицы) без пор, равной $1000 \div 1440$ К, которая измерялась в опытах без микросфер [17].

Другим важным параметром, который определяет возможность инициирования энергетического материала, окружающего пору, и необходим при моделировании, является время существования локального очага с повышенной температурой. В результате потери энергии за счет излучения и теплообмена с окружающей средой температура горячей точки падает, этому способствует и ее гидродинамическое разрушение на несколько отдельных очагов меньшего размера, как показано в [18]. Длительность импульса светового излучения, который авторы работ [16, 19] связывают со сжатием стеклянных микробаллонов в инертной среде, изменяется (в зависимости от среды, в которой находятся микробаллоны, и от давления УВ) в пределах $0.25 \div 1$ мкс, что на несколько порядков меньше значений, которые получены при оценке потерь энергии горячей точкой за счет теплопроводности и светового излучения в случае использования для расчета стационарных коэффициентов переноса.

Возможность сильного изменения коэффициентов теплопереноса в результате турбулентного перемешивания в среде при прохождении УВ отмечалась и в [20, 21]. Авторы этих работ анализировали время реакции термодпары при измерении температуры среды при ее ударном нагреве. В [20] отмечалось, что обтекание термодпары высокоскоростным потоком вещества за фронтом УВ в условиях высокого динамического давления значительно ускоряет процесс выравнивания температуры горячего спая с температурой окружающей среды за счет, по-видимому, конвективного турбулентного теплообмена. Оценка времени достижения максимума термоЭДС в [21] дала значения $0.7 \div 1.2$ мкс, что на шесть порядков меньше расчетного времени теплообмена термодпары с исследуемой средой при отсутствии в ней конвективного движения. Исследования влияния среды, в которой находится горячая точка, на время ее существования немного. Еще один малоизученный вопрос — это поведение поры, расположенной на твердой стенке. Подобные исследования имеют отношение к работе литотриптеров — аппаратов, применяемых в качестве неинвазивного метода дробле-

ния камней при мочекаменной болезни. В работе [22] проведено моделирование несферического сжатия пузырьков, находящихся у жесткой стенки, под действием УВ, генерируемых в литотриптере. Моделирование показало, что из-за наличия жесткой стенки возникает отраженная УВ, которая взаимодействует с падающей волной, что оказывает влияние на динамику сжатия пузырьков. Влияние жесткой поверхности на динамику пузырька сохраняется независимо от начального радиуса пузырька или его начальных условий.

Целью данной работы являлось выяснение условий, определяющих время установления теплового равновесия в вязкой среде после прохождения УВ и образования горячих точек. В качестве критерия принималась длительность спада интенсивности излучения, регистрируемого в эксперименте. В опытах изменялись вязкость среды, в которой находились стеклянные микробаллоны (вода или твердая эпоксидная смола), а также материал оптического окна. Экспериментально выяснялось влияние жесткой поверхности на длительность светового импульса от горячих точек, расположенных на границе образец — оптическое окно.

ЭКСПЕРИМЕНТ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Схема опытов показана на рис. 1. Ударник из сплава Д16Т толщиной $10 \div 5$ мм со скоростью $2.2 \div 5$ км/с генерировал УВ в алюминиевой пластине — экране толщиной 4 мм. Далее УВ проходила в образец и оптическое окно. Тепловое излучение из ударно-сжатой зоны образца падало на торцы пучка световодов, расположенных на расстоянии 46 мм от поверхности образца, и передавалось из взрыв-

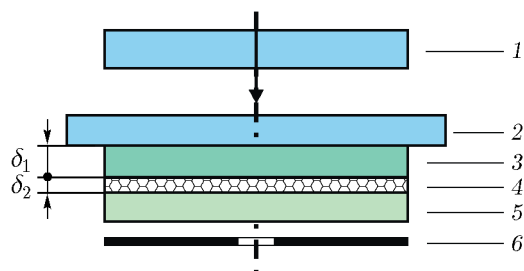


Рис. 1. Схема эксперимента со сплошным гетерогенным образцом:

1 — ударник, 2 — экран, 3 — слой твердой эпоксидной смолы или воды, 4 — эпоксидная смола + микробаллоны, 5 — оптическое окно, 6 — апертура

ной камеры к четырехканальному быстродействующему оптическому пирометру, использующему фотоумножители (ФЭУ) в качестве детекторов излучения. В измерительных каналах устанавливали интерференционные светофильтры на линиях $\lambda = 550$ и 630 нм с шириной полосы пропускания $\Delta\lambda = 10$ и 20 нм соответственно либо устанавливали комбинированный светофильтр КС-СЗС из цветного стекла ($\lambda = 660$ нм, $\Delta\lambda = 120$ нм) и светофильтр из стекла ОС-12 с нижней границей пропускания 560 нм. Временное разрешение измерительного тракта в различных опытах менялось и составляло $10 \div 50$ нс. В экспериментах регистрировали яркостную температуру и временные характеристики оптического излучения. Оптический тракт с фотоумножителями перед каждым опытом калибровали при помощи образцовой температурной лампы ТРУ 1100-2350 в рабочем диапазоне температур лампы (до 2350 К). В ряде опытов использовался быстродействующий кремниевый детектор DET 210 с временным разрешением ≈ 1 нс.

Испытывались образцы, представляющие собой матрицу из воды либо из эпоксидной смолы, в которую внесены стеклянные микробаллоны марки МС-В. Максимум функции распределения микробаллонов по размерам находился в диапазоне $50 \div 60$ мкм. Толщина стенки микробаллонов составляла ≈ 1 мкм.

На выходе из экрана 2 (см. рис. 1) УВ последовательно проходила три слоя. Верхний слой 3 толщиной $\delta_1 = 0 \div 5$ мм представлял собой твердую эпоксидную смолу или воду. Второй слой 4 — собственно образец, содержащий микробаллоны, толщина которого δ_2 изменялась от толщины монослоя 90 мкм до нескольких миллиметров. В опытах с водой монослой создавался путем напыления микробаллонов на липкий скотч. Третий слой 5 — оптическое окно, материал которого варьировали: твердая эпоксидная смола, вода, плексиглас (ПММА) или кристалл LiF.

Опыты проводили в двух постановках. В первой использовался сплошной гетерогенный образец, толщина которого составляла $0.5 \div 5$ мм. Для его изготовления в матрицу — эпоксидную смолу плотностью $\rho_0 = 1.13$ г/см³ добавляли микробаллоны (массовая доля $\approx 2\%$). Плотность такого компаунда составляла $\rho_{00} = 1.054$ г/см³, расчетная пористость $k = (\rho_0 - \rho_{00})/\rho_0 = 0.068$. В такой схеме можно было определить среднюю температуру горячих точек.

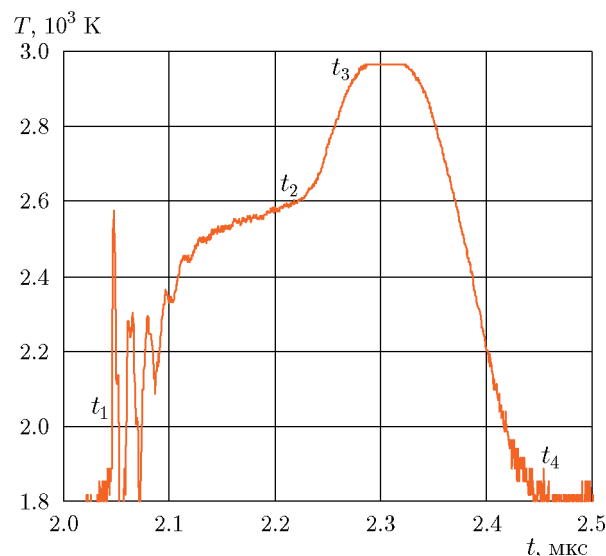


Рис. 2. Профиль яркостной температуры составного гетерогенного образца:

образец — эпоксидная смола, эпоксидная смола + МС-В; оптическое окно — эпоксидная смола; $p = 29$ ГПа

Во второй постановке внутри матрицы создавали монослой микросфер (скотч толщиной 40 мкм + микробаллоны, $\delta_2 = 90$ мкм). Монослой заливали жидкой эпоксидной смолой, которую затем полимеризовали. В другом варианте этой схемы в качестве материала матрицы использовалась вода, а монослой микросфер размещали внутри слоя воды или на границе с оптическим окном.

На рис. 2 приведен профиль яркости от составного образца. Первый слой — эпоксидная смола. Вторым слоем — смола + микробаллоны толщиной ≈ 0.5 мм. Третий слой — оптическое окно из эпоксидной смолы. Временная привязка по скорости УВ показывает, что сигнал при прохождении по первому слою эпоксидной смолы отсутствует и появляется только при ее входе (t_1) в слой смеси смолы + микробаллоны. После прохождения этого слоя и движения по однородной эпоксидной смоле (оптическому окну) сигнал при данном уровне чувствительности не регистрируется (t_4). Полученная зависимость интенсивности излучения является типичной при нагружении образцов, рассеивающих излучение, например образцов фторопласта [23]. Первая фаза сигнала $t_2 - t_1 = 2.018 \div 2.2$ мкс включает в себя быстрый рост яркости при нарастании толщины светящегося слоя с последующим медлен-

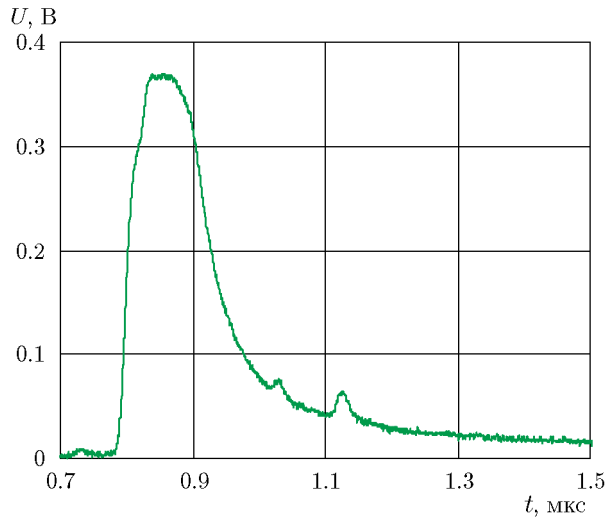


Рис. 3. Профиль яркости монослоя МС-В внутри слоя эпоксидной смолы, $p = 11$ ГПа ($\Delta t_1 = 0.04$ мкс, $\Delta t_2 = 0.27$ мкс)

ным ростом за счет уменьшения толщины рассеивающего слоя. Вторая фаза сигнала — узкий пик с временем нарастания интенсивности $t_3 - t_2 \approx 0.09$ мкс и спада $t_4 - t_3 \approx 0.14$ мкс представляет собой временную зависимость светимости граничного слоя микросфер.

В работе [16] отмечалось, что при использовании эпоксидной смолы в качестве матрицы одной из возможных причин быстрого спада интенсивности излучения горячих точек может быть экранировка излучения ударно-сжатым слоем смолы. Для проверки этого предположения проведен эксперимент при пониженном ударном давлении в матрице $p = 11$ ГПа, температура матрицы при этом ≈ 700 К и, как показано в [17], она сохраняет прозрачность. Результат этого опыта — профиль яркости монослоя микробаллонов, помещенного в сплошную твердую эпоксидную смолу, приведен на рис. 3. Здесь длительность переднего фронта сигнала, который сопоставляется с временем разгорания горячей точки, $\Delta t_1 = 0.04$ мкс, а время релаксации яркости горячей точки $\Delta t_2 = 0.27$ мкс. Результаты опытов в такой постановке также свидетельствуют, что экранировка не наблюдается.

В аналогичной постановке выполнены и опыты, в которых монослой микробаллонов находился в воде. Профиль яркости на рис. 4 имеет такой же характер, что и профиль, полученный при использовании матрицы из эпоксидной смолы (см. рис. 3), но со значениями вре-

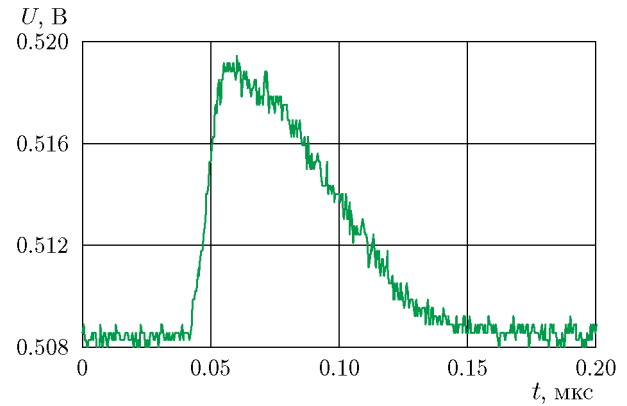


Рис. 4. Профиль яркости монослоя МС-В внутри слоя воды, $p = 9$ ГПа ($\Delta t_1 = 0.011$ мкс, $\Delta t_2 = 0.07$ мкс, регистратор — детектор DET 210)

Среднее время спада излучения

p , ГПа	t , мкс	
	вода	эпоксидная смола
$0.7 \div 1.8$	—	0.17
$8.6 \div 9.2$	0.05	0.16
$19 \div 29$	0.13	0.19

мен $\Delta t_1 = 0.01$ мкс и $\Delta t_2 = 0.07$ мкс. Время спада яркости излучения, так же как и в опыте со смолой, очень короткое. Надо отметить, что данные, которые приведены в [24], показывают, что вода при этих давлениях прозрачна, следовательно, спад яркости не связан с экранировкой горячих точек излучением окружающего их вещества.

В таблице приведены данные экспериментов с микробаллонами, находящимися в твердой эпоксидной смоле или в воде, которые показали, что время спада интенсивности излучения при различных давлениях в случае воды несколько меньше, чем в случае эпоксидной смолы. Разброс времени высвечивания в обоих случаях оказался большим, и он может быть связан с особенностями гидродинамического движения среды, окружающей микробаллоны, а также с различной степенью заполнения ими той части монослоя, с которой регистрируется излучение.

Для того чтобы проверить возможное влияние турбулентного перемешивания, проводились эксперименты в другой постановке. Образцы, как сплошной гетерогенный, так и моно-

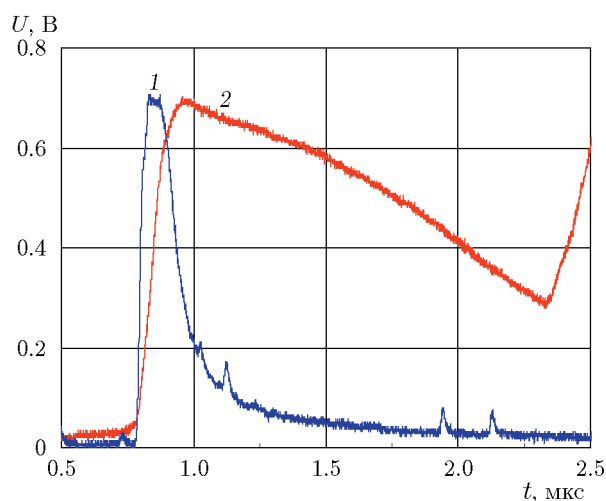


Рис. 5. Профили яркости монослоев МС-В ($\delta_2 = 90$ мкм) в эпоксидной смоле:

1 — образец нанесен на оптическое окно из эпоксидной смолы, $p = 11$ ГПа, 2 — на оптическое окно из LiF, $p = 21$ ГПа

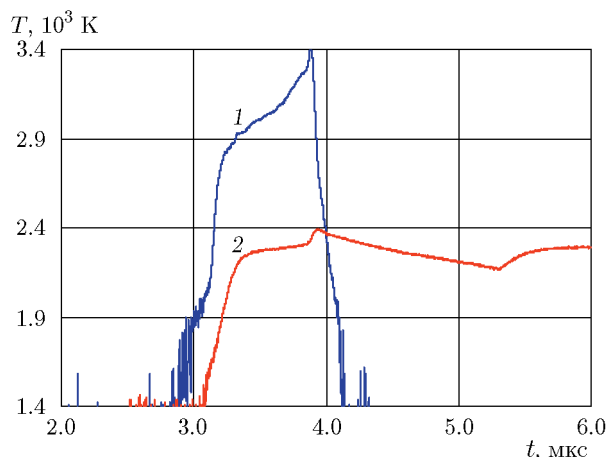


Рис. 6. Профили температуры сплошных гетерогенных образцов — эпоксидная матрица + МС-В ($\delta_2 = 5.4$ мм):

1 — образец нанесен на оптическое окно из эпоксидной смолы, $p = 29$ ГПа, 2 — на оптическое окно из LiF, $p = 22$ ГПа

слой микросфер, размещались непосредственно на оптическом окне из эпоксидной смолы или LiF. Предполагалось, что наличие преграды с различными механическими характеристиками меняет характер гидродинамического течения среды, в которой находятся микробаллоны, при прохождении ударной волной границы эпоксидная матрица — окно и, как следствие, меняет время высвечивания микросфер.

Профили яркости, полученные от образцов из монослоя МС-В в матрице из эпоксидной

смолы, помещенных на окна из разных материалов, представлены на рис. 5. Они демонстрируют сильное изменение длительности излучения горячих точек в зависимости от используемого материала окна. Если с окном из эпоксидной смолы время высвечивания не превосходит 0.27 мкс (см. рис 5, кривая 1), то с окном из LiF оно равно $\Delta t_2 = 1.5$ мкс (кривая 2) и ограничено временем регистрации, которое определяется в первую очередь приходом УВ на тыльную сторону окна и ее выходом в воздух.

Сопоставление профилей температуры сплошных гетерогенных образцов в опытах с окнами из эпоксидной смолы и из LiF показано на рис. 6. В случае гетерогенных образцов время спада температуры с окном из эпоксидной смолы составляет 0.08 мкс, а с окном из LiF > 2 мкс. Однако корректнее говорить не о длительности заднего фронта температурного профиля сигнала, а о рассчитанной по ней скорости спада температуры: на профиле 1 рис. 6 она составляет $1.86 \cdot 10^4$ К/мкс, а на профиле 2 всего лишь $0.015 \cdot 10^4$ К/мкс.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Основная цель настоящей работы — проверить возможное влияние свойств среды, окружающей микробаллоны, на время затухания свечения, регистрируемого при нагружении их ударной волной. В первую очередь выяснялось, определяется ли это затухание экранировкой излучения ударно-сжатом слоем окружающего вещества. Результаты экспериментов, проведенных с составным (см. рис. 2) и сплошным (см. рис. 3) образцами, показывают, что быстрый спад регистрируемого свечения горячих точек не связан с экранировкой их излучения слоем ударно-сжатой смолы. Это же подтвердили и опыты, в которых в качестве среды, окружающей микробаллоны, использовалась вода, — время затухания свечения при этом не увеличилось. Как отмечено выше, при давлениях, которые реализовывались в данной работе, вода прозрачна [24], что подтверждает тем самым отсутствие экранировки.

Матрица (вода или эпоксидная смола) при наличии в ней микробаллонов локально сильно неоднородна. При подходе фронта УВ к границе матрица — пора возникает разрыв параметров потока. После коллапса пор вне зависимости от механизма, в результате которого он происходит, давление в окрестности

горячих точек устанавливается на постоянном уровне до тех пор, пока не подходит волна разрежения. В проведенных экспериментах постоянное давление в области расположения монослоев с микробаллонами существовало в течение $1.5 \div 3$ мкс в зависимости от конфигурации эксперимента. Длительность спада излучения заметно меньше, поэтому падение давления в области горячей точки и соответственно снижение температуры не могли быть причиной релаксации излучения.

Другая возможная причина быстрой релаксации излучения — интенсивное движение среды за фронтом УВ, приводящее к разрушению образовавшихся горячих точек на отдельные более мелкие «фрагменты» и их дальнейшее остывание [3]. Чтобы проверить, каким образом вязкость среды влияет на динамику течения за фронтом УВ, были поставлены опыты с твердой эпоксидной смолой и водой в качестве матрицы. В исходном состоянии их вязкость сильно различается. Проведенные эксперименты показали, что при замене исходной твердой эпоксидной смолы на воду длительность излучения в целом уменьшилась незначительно. Такой же вывод был сделан ранее в статье [19], где определялось время формирования горячих точек.

В то же время результаты для двух типов матрицы — эпоксидная смола или вода — сильно отличаются, если образец располагается на оптическом окне с разными характеристиками материала. Сравнение профилей яркости сплошных гетерогенных образцов показало, что время затухания сильно зависит от материала оптического окна. Так, при выходе УВ из образца в окно из эпоксидной смолы среднее время затухания зависит от давления и лежит в диапазоне $\Delta t_2 \approx 0.17 \div 0.19$ мкс при изменении давления от 0.7 до 29 ГПа. В случае, когда образец граничит с окном из LiF, время затухания яркости увеличивается, по меньшей мере, на порядок по сравнению с окном из эпоксидной смолы, и длительность заднего фронта импульса излучения составляет $\Delta t_2 \approx 2.5$ мкс (амплитуда яркости уменьшается в e раз). Аналогичная картина наблюдается и для монослоев MC-B, размещенных на окнах из различных материалов. В этом случае (см. рис. 5) время затухания яркости увеличивается с $\Delta t_2 = 0.28$ мкс (окно из эпоксидной смолы) до $\Delta t_2 > 2.5$ мкс (окно из LiF). Достигнутое в этих опытах время затухания яркости, тем

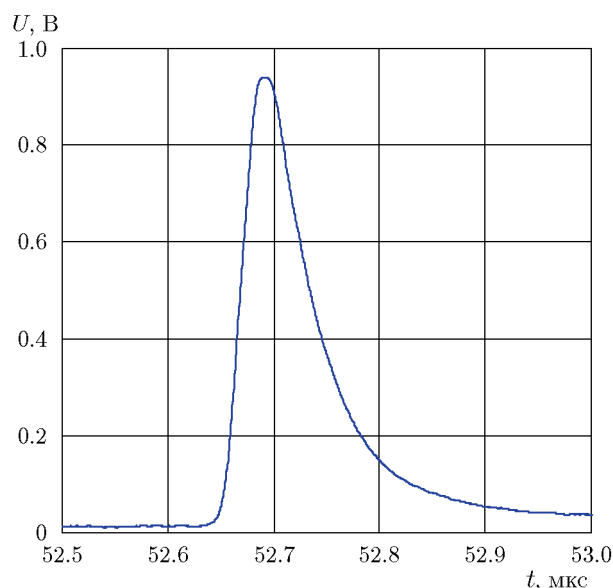


Рис. 7. Профиль яркости монослоя MC-B на границе вода/LiF, $p = 9$ ГПа

не менее, много меньше оценок времени температурной релаксации горячих точек за счет механизмов теплопроводности ($t_a = 10^{-2}$ с) и излучения ($\tau = 2.4 \cdot 10^{-3}$ с), которые приведены во введении.

Аналогичная серия опытов с водой в качестве материала матрицы не показала увеличения времени затухания при переходе УВ из воды через монослой MC-B в LiF. В этих опытах не отмечено изменения Δt_2 в зависимости от материала окна: ПММА или LiF. На рис. 7 показан профиль яркости, полученный в случае, когда монослой MC-B помещен на окно из LiF в воде. Длительность заднего фронта импульса излучения ≈ 0.1 мкс, что намного меньше по сравнению с экспериментом, в котором монослой в эпоксидной смоле также находился на окне из LiF (см. рис. 5, кривая 2). Следует отметить, что при близких плотностях воды и эпоксидной смолы ($\rho_{\text{перoxy}} = 1.13$ г/см³) эти материалы сильно различаются вязкостью. С другой стороны, при замене материала окна не только увеличивается его плотность до $\rho_{\text{LiF}} = 2.64$ г/см³, но также изменяются прочностные свойства.

При падении УВ на окно из LiF из-за разницы динамических импедансов окна и матрицы в нее обратно движется отраженная УВ, поэтому другим возможным механизмом замедления спада яркости в течение более 2.5 мкс в опытах, представленных на рис. 5 и 6 (см.

кривые 2), могло быть повышение температуры в объеме эпоксидной матрицы при отражении УВ от окна. Для выяснения вклада этого эффекта в регистрируемую яркость была измерена температура при отражении от LiF падающей волны с давлением $p_1 = 18.9$ ГПа и температурой за фронтом $T_1 = 940$ К. Давление определялось по измеренной скорости УВ в эпоксидной смоле и в LiF при отражении по ударным адиабатам из [25]. В результате в отраженной волне рассчитано состояние с $p_2 = 38.5$ ГПа и измерена температура $T_2 = 1260$ К. Оценка средней температуры горячих точек на составных образцах (см. рис. 6, кривая 2) дала значение $T_{hp} \approx 2400$ К. Оценка по закону излучения Вина [26] отношения яркости при $T_2 = 1260$ К к яркости при $T_{hp} \approx 2400$ К на длине волны $\lambda = 630$ нм дает значение $\approx 2 \cdot 10^{-4}$. Поэтому на фоне яркости горячих точек объемным свечением эпоксидной смолы можно пренебречь и рассматривать регистрируемую амплитуду яркости как относящуюся только к излучению горячих точек.

Еще один из эффектов, который может привести к увеличению времени спада температуры образца, — это повторный нагрев неоднородности, возникшей на месте схлопнувшейся поры, под действием УВ, отраженной от окна из LiF. По-видимому, этот эффект мал, поскольку в эксперименте с матрицей из воды и окном из LiF он не был замечен, и длительность спада составляла < 0.15 мкс. Поэтому именно вязкость среды в случае использования эпоксидной смолы для матрицы играет основную роль в увеличении длительности спада излучения.

Сопоставление этих результатов дает основание полагать, что в быстром спаде яркости излучения горячих точек основную роль играет турбулентное движение среды за фронтом УВ. Воздействие ударной волны или волны сжатия на пору и ее последующий коллапс приводят к сильному возмущению и турбулентности потока, обтекающего ее. Данный эффект неоднократно подтверждался экспериментально и численным моделированием (см., например, [2, 8, 27, 28]).

Потерю яркости образца с включениями горячих точек можно объяснить релаксацией осредненной температуры. В этом случае полученные результаты качественно согласуются с механизмом теплопроводности вещества за счет турбулентного перемешивания [29]. Ре-

зультаты опытов показывают, что при численном моделировании температурного поля при прохождении поры ударной волной необходимо учитывать вязкость и прочность вещества матрицы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боуден Ф. П., Иоффе А. Д. Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких веществах. — М.: Изд-во иностр. лит., 1955.
2. Bourne N. K., Field J. E. Bubble collapse and the initiation of explosion // *Proc. Roy. Soc. Lond. A.* — 1991. — V. 435. — P. 423–435. — DOI: 10.1098/rspa.1991.0153.
3. Bourne N. K., Field J. E. Shock-induced collapse of single cavities in liquids // *J. Fluid Mech.* — 1992. — V. 244. — P. 225–240. — DOI: 10.1017/S0022112092003045.
4. Bourne N. K., Field J. E. Explosive ignition by the collapse of cavities // *Proc. Roy. Soc. Lond. A.* — 1999. — V. 455. — P. 2411–2426. — DOI: 10.1098/rspa.1999.0410.
5. Bourne N. K. On the collapse of cavities // *Shock Waves.* — 2002. — V. 11, N 6. — P. 447–455. — DOI: 10.1007/s001930200128.
6. Swantek A. B., Austin J. M. Collapse of void arrays under stress wave loading // *J. Fluid Mech.* — 2010. — V. 649. — P. 399–427. — DOI: 10.1017/S0022112009993545.
7. Колганов Е. Б., Соснин В. А. Эмульсионные промышленные взрывчатые вещества. — Дзержинск: ГосНИИ «Кристалл», 2009.
8. Ozlem M., Schwendeman D. W., Kapila A. K., Henshaw W. D. A numerical study of shock-induced cavity collapse // *Shock Waves.* — 2012. — V. 22, N 2. — P. 89–117. — DOI: 10.1007/s00193-011-0352-9.
9. Khasainov B. A., Borisov A. A., Ermolaev B. S., Korotkov A. I. Two-phase viscoplastic model of shock initiation of detonation in high density pressed explosives // *Deton. 7th Symp. on Detonation*, White Oak, MD, Naval Surface Weapons Center. — 1982. — P. 435–447.
10. Tran L., Udaykumar H. S. Simulation of void collapse in an energetic material, Part 1: Inert case // *J. Propul. Power.* — 2006. — V. 22, N 5. — P. 947–958. — DOI: 10.2514/1.13146.
11. Kang J., Butler P. B., Baer M. R. A Thermomechanical analysis of hot spot formation in condensed-phase, energetic materials // *Combust. Flame.* — 1992. — V. 89, N 2. — P. 117–139. — DOI: 10.1016/0010-2180(92)90023-I.
12. Carrol M., Holt A. C. Static and dynamic pore-collapse relation for ductile porous materials // *J. Appl. Phys.* — 1972. — V. 43, N 4. — P. 1626–1635. — DOI: 10.1063/1.1661372.
13. Turley W. D., La Lone B. M., Mance J. G., Staska M. D., Stevens G. D., Veaser L. R.,

- Dattelbaum D. M.** Experimental observations of shock-wave-induced bubble collapse and hot-spot formation in nitromethane liquid explosive // *J. Appl. Phys.* — 2021. — V. 129, N 14. — 145102. — DOI: 10.1063/5.0039414.
14. **Lefrancois A., Grouffal J.-V., Bouinot P., Mencacci S.** Temperature and pressure measurements comparison of the aluminized emulsion explosives detonation front and products expansion // *Proc. 12th Symp. (Int.) on Detonation.* — 2002. — P. 432–439.
15. **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.
16. **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.
17. **Бордзиловский С. А., Караханов С. М., Хищенко К. В.** Измерение яркостной температуры эпоксидной смолы при ударном сжатии // *Физика горения и взрыва.* — 2013. — Т. 49, № 1. — С. 138–142.
18. **Bourne N. K., Milne A. M.** On cavity collapse and subsequent ignition // *Proc. 12th Symp. (Int.) on Detonation.* — 2002.
19. **Караханов С. М., Пластинин А. В., Бордзиловский С. А., Бордзиловский Д. С.** Время формирования горячих точек при ударном сжатии микробаллонов в конденсированной среде // *Физика горения и взрыва.* — 2016. — Т. 52, № 3. — С. 105–113. — DOI: 10.15372/FGV20160315.
20. **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. — DOI: 10.1063/1.92272.
21. **Сильвестров В. В., Бордзиловский С. А., Гулевич М. А., Караханов С. М., Пай В. В., Пластинин А. В.** Измерение температуры ударно-сжатой эмульсионной матрицы // *Физика горения и взрыва.* — 2016. — Т. 52, № 2. — С. 138–145. — DOI: 10.15372/FGV20160216.
22. **Calvisi M. L., Poreta J. I., Szeri A. J.** Dynamics of bubbles near a rigid surface subjected to a lithotripter shock wave. Part 2. Reflected shock intensifies non-spherical cavitation collapse // *J. Fluid Mech.* — 2008. — V. 616. — P. 63–97. — DOI: 10.1017/S0022112008003054.
23. **Бордзиловский С. А., Караханов С. М.** Световое излучение фторопласта в ударной волне интенсивностью 51 ГПа // *Физика горения и взрыва.* — 2007. — Т. 43, № 5. — С. 107–115.
24. **Бордзиловский С. А., Караханов С. М., Хищенко К. В.** Тепловое излучение воды за фронтом отраженной ударной волны // *Физика горения и взрыва.* — 2018. — Т. 54, № 6. — С. 95–103. — DOI: 10.15372/FGV20180611.
25. **Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ** / под ред. Р. Ф. Трунина. — Саров: Изд-во ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006.
26. **Свет Д. Я.** Оптические методы измерения истинных температур. — М.: Наука, 1982.
27. **Swantek A. B., Shukla R. K., Austin J. M.** Effect of loading wave profile on hydrodynamic void collapse in detonation initiation // 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 4–7 Jan., 2010, Orlando, Florida.
28. **Milne A. M., Bourne N. K.** Experimental and numerical study of temperatures in cavity collapse // *AIP Conf. Proc.* — 2002. — V. 620, N 1. — 914. — DOI: 10.1063/1.1483686.
29. **Carter J., Pathikonda G., Jiang N. et al.** Time-resolved measurements of turbulent mixing in shock-driven variable-density flows // *Sci. Rep.* — 2019. — V. 9. — 20315. — DOI: doi.org/10.1038/s41598-019-56736-w.

Поступила в редакцию 06.10.2022.

После доработки 31.10.2022.

Принята к публикации 14.12.2022.