

УДК 533.06.011

ВРЕМЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГОРЯЧИХ ТОЧЕК ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ МИКРОБАЛЛОНОВ В КОНДЕНСИРОВАННОЙ СРЕДЕ

С. М. Караханов¹, А. В. Пластинин¹, Д. С. Бордзиловский²,
С. А. Бордзиловский^{1,3}

¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, karakhanov@hydro.nsc.ru

²Институт лазерной физики СО РАН, 630090 Новосибирск

³Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

Проведена регистрация теплового излучения в оптическом диапазоне спектра при ударном коллапсе стеклянных или полимерных микробаллонов, помещенных в прозрачную конденсированную среду: воду или полимеризованную эпоксидную смолу. Определены временные характеристики регистрируемого излучения в диапазоне давления $0.5 \div 29$ ГПа при различной вязкости материала, окружающего пору. Проведена оценка яркостной температуры горячих точек, значения которой составили $1\,600 \div 3\,200$ К при давлении $2 \div 29$ ГПа. Длительность переднего фронта импульса излучения, соответствующего времени формирования горячей точки, возрастает от $2 \cdot 10^{-8}$ до $30 \cdot 10^{-8}$ с в зависимости от интенсивности ударной волны и вязкости материала, окружающего пору. Анализ полученных данных показывает, что в диапазоне давления $5 \div 29$ ГПа основную роль в формировании горячих точек играет гидродинамический механизм коллапса, в диапазоне $0.5 \div 5$ ГПа — вязкопластический механизм.

Ключевые слова: ударные волны, микробаллоны, коллапс поры, горячие точки, вязкость.

DOI 10.15372/FGV20160315

ВВЕДЕНИЕ

Твердые конденсированные вещества, которые используются в экспериментах по динамическому нагружению, обычно являются гетерогенными из-за наличия в них микронеоднородностей. Природа возникновения неоднородностей, а также их физическая форма весьма разнообразны (поры и полости в твердых веществах, пузырьки в жидкости, неоднородности плотности и т. д.). В настоящее время общепризнано, что при ударно-волновом нагружении таких гетерогенных веществ, твердых или жидких, в местах расположения неоднородностей образуются локальные очаги с повышенной концентрацией энергии, так называемые горячие точки (ГТ) [1]. Температура этих очагов заметно выше, чем температура объемного разогрева вещества, в котором они находятся. Многочисленные исследования процесса коллапса микропор при их быстрой

деформации стимулированы той большой ролью, которую он играет в различных областях науки и техники. Это инициирование гетерогенных взрывчатых веществ, проблемы разрушения деталей машин при кавитации, вопросы безопасного использования литотрипторов и т. д. Подробное изучение коллапса пор позволило выделить основные механизмы генерации ГТ. К ним относятся: нагрев гидродинамическим течением, связанный с формированием струи на верхней по направлению ударной волны (УВ) стенке полости и с последующим ударом струи по нижней поверхности полости [2–8]; адиабатический нагрев газа в полости [9–11]; адиабатический сдвиг в материале матрицы, окружающей полость [12, 13]; вязкопластический механизм [14–18].

В работе [4] экспериментально исследован коллапс крупных дискообразных полостей размером $5 \div 12$ мм, наполненных воздухом и находящихся либо в желатиновом геле, либо в эмульсии на основе смеси аммиачной и натриевой селитры. Сделан вывод, что в инертном материале при сжатии полости первичным механизмом образования ГТ является формирование струи с последующим соударением с нижней поверхностью полости, которое вызывает

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-03-0088-а) и фонда Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (НШ-2695.2014.1).

© Караханов С. М., Пластинин А. В., Бордзиловский Д. С., Бордзиловский С. А., 2016.

тем самым ударную волну. Вторичным механизмом является адиабатический нагрев газа в тороидальной полости, формирующейся в результате схлопывания сферы. Авторы [5] при помощи высокоскоростной покадровой видеосъемки рассмотрели взаимодействие плоской УВ с одиночными дискообразными полостями диаметром $3 \div 12$ мм в диапазоне давления $0.3 \div 3.5$ ГПа. В результате установлено, что коллапс двумерных полостей проходит асимметрично, с образованием высокоскоростной струи, ударяющей по противоположной стенке полости. При низком давлении скорость струи почти постоянна. При повышении давления до 3.5 ГПа скорость струи возрастает настолько, что струя проходит через полость быстрее, чем УВ, которая сжимает пору. В конце процесса сжатия образуются два вихря, внутри которых газ светится.

Экспериментально и численно гидродинамика коллапса набора воздушных пузырьков размером 3 мм в желатине исследована в [8]. Авторы этой работы также зафиксировали асимметричный коллапс пузырька и образование внутренней струи. Здесь же было рассмотрено воздействие отдельных пузырьков друг на друга, что, по мнению авторов, представляет интерес не только для инициирования взрывчатых веществ (ВВ), но и для использования в гидравлике и медицинской практике. В [19] численно моделировался процесс сжатия полости внутри вещества с характерными параметрами для типичного ВВ на основе октогена. Физический размер полости, моделируемой в расчетах, составлял 0.1 мм. Результаты 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.

Влияние адиабатического сжатия газа при коллапсе и последующий разогрев материала, прилегающего к поре, рассматривались в работах [9, 10, 20]. Выводы этих работ сводятся к тому, что данный механизм не является основным при инициировании твердых гетерогенных ВВ, поскольку он может быть эффективным только при медленном нарастании давления и относительно больших размерах полостей. В то же время в работе [11] авторы, экспериментально исследуя коллапс 3-миллиметровых полостей, находящихся в желати-

новом геле, пришли к выводу, что при низком давлении возникновение свечения на месте полости обусловлено сжатым газом, а не соударением струи с противоположной стенкой. Однако они не исключали, что при более высоком давлении основную роль будет играть струя, образующаяся внутри полости. В работе [11] проведен эксперимент по инициированию первичного ВВ и показано, что при заданных условиях опыта инициирование определялось сжатым газом, а не струей. И хотя результаты ряда работ по этому вопросу расходятся друг с другом, большинство авторов все же полагают, что сжатие газа может доминировать только тогда, когда скорость сжатия мала, а полости имеют большой размер.

Экспериментальные свидетельства разогрева зон пластической деформации (плоскости скольжения, зоны сдвига) и значительного роста температуры на поверхностях разрушения получены в [12] путем подбора вещества, необратимо меняющего цвет при нагревании и сходного по своим свойствам с твердым ВВ. Численное моделирование развития сдвига в твердом ВВ с учетом выделения тепла за счет пластической деформации, вязкости и химической реакции показало, что температура рассматриваемой зоны при давлении ≈ 1 ГПа и скорости сдвига ≈ 0.2 км/с достигает 1200 °С [13].

Анализ вязкопластического разогрева материала, в котором находится пора, при ударном нагружении проведен в [14]. Авторы, основываясь на критериях, определяющих динамику движения пузырька в вязкой жидкости [15], показали, что вязкопластический механизм может эффективно инициировать твердое конденсированное ВВ при размере пор вплоть до 1 мкм. В качестве критерия реализации этого механизма выбрано соотношение между критическим и физическим размерами пор: $\delta_0 \ll \delta_\mu$. Здесь δ_0 — характерный размер пор в нагружаемом веществе, $\delta_\mu = 8.4\mu / [\rho_{sh}(p_{sh} - p_y)]^{0.5}$ — критический размер поры, где ρ_{sh} , p_{sh} , p_y , μ — плотность, давление, предел прочности и вязкость ударно-сжатой среды соответственно. Предполагается, что если это соотношение выполняется, то пора сжимается в вязком режиме. Авторы [16] считают, что в качестве критерия реализации вязкого режима деформирования поры можно использовать также соотношение между характеристическим временем деформирования

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

и временем прохождения УВ через пору

$$t_p = \delta_0/u_s,$$

где 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.

Возможность образования горячей точки в конденсированном энергетическом материале при симметричном коллапсе сферической полости исследована в [17] на основе подхода, предложенного ранее в [18]. Гидродинамические аспекты генерирования ГТ при этом не рассматривались. Основные результаты моделирования получены при диаметре поры 10 мкм, давлении 1 ГПа, вязкости 50 Па·с. Оказалось, что при этих условиях вязкопластический разогрев вещества имеет большое значение. При сжатии внутренняя поверхность поры быстро нагревается до температуры ≈ 1900 К, что приводит к испарению энергетического вещества внутрь полости и его последующему взрыву. Отмечено, что при большой скорости коллапса нагрев за счет вязкой работы является доминирующим источником тепла, при этом тепловой слой, прилегающий к поверхности поры, очень тонкий и в нем, как правило, есть жидкий слой. При переходе через границу раздела жидкое/твердое вязкость и предел текучести сильно меняются. О том, что диссипация энергии в материал, окружающий пору, обусловлена разогревом в результате вязкопластического течения, а не действием газа, нагретого в поре, говорилось также в работе [10].

Результаты моделирования коллапса сферической полости для невязкой сжимаемой жидкости в [2, 3] и для среды с механическими свойствами, соответствующими октогену и включающими вязкопластическую работу [16], показали, что основной вклад в возникновение высокотемпературной зоны вносит механизм соударения струи с нижней по потоку стенок полости.

Анализируя в целом коллапс пор, исследователи сходятся во мнении, что идеальные модели (симметричный коллапс, гидродинамическое течение и т. д.) по отдельности не могут описывать разогрев материала и в результате — образование ГТ. Тот или иной механизм доминирует в зависимости от условий: размера поры, скорости роста давления, вязкости и

предела прочности материала и т. д. (см., например, [7, 16]).

Большая часть исследований, представленных в литературе, проведена на основе численного моделирования коллапса при различных условиях. Однако экспериментальных работ намного меньше, что вполне объясняется трудностями постановки опытов в малом пространственном масштабе с высоким временным разрешением. Размеры пор порядка $1 \div 100$ мкм не позволяют регистрировать процесс коллапса путем покадровой съемки, поэтому целесообразно применение других методик, которые дают возможность получить необходимую информацию.

В данной работе в качестве такой методики выбрана регистрация теплового излучения в оптическом диапазоне спектра при коллапсе микробаллонов, помещенных в конденсированную среду. Исследование этого процесса представляет несомненный практический интерес, поскольку эти микробаллоны широко применяются в качестве сенсibilизатора для эмульсионных взрывчатых веществ [21].

Цель данной работы — анализ временных характеристик регистрируемого излучения в широком диапазоне давления, при этом сделано предположение, что время формирования ГТ совпадает с временем коллапса полости. Тогда при уменьшении давления должен произойти переход от гидродинамического режима схлопывания, при котором время формирования ГТ практически совпадает с временем прохождения УВ через полость и слабо зависит от давления [2, 16], к вязкопластическому режиму, при котором время формирования ГТ сильно зависит от давления (уравнение (1)).

Специальный акцент сделан на возможном определении давления перехода от гидродинамического режима к вязкопластическому, когда вклад последнего в образование ГТ оказывается доминирующим. Рассмотрение именно этого механизма обусловлено тем, что аналитическое исследование, проведенное в [14], выделяет параметры, определяющие динамику коллапса поры: вязкость среды и давление УВ, действующей на пору.

Основанием возможности определения границы, отделяющей различные доминирующие режимы друг от друга, служат следующие оценки. В выражении для определения критического размера поры (δ_{μ}) наибольшую неопределенность имеет выбор вязкости сре-

ды. Для стекла даже при температуре варки $1480 \div 1500$ °С вязкость составляет $\mu = 11$ Па·с (у стали при 1400 °С — 0.00025 Па·с, у воды при 20 °С — 0.001 Па·с) [22]. По мере понижения температуры вязкость стекла быстро возрастает и при комнатной температуре достигает значений $>10^9$ Па·с. Для $\mu \approx 10$ Па·с (как указано выше, при температурах, характерных для расплавленной стекломассы) при $p_s - p_y \approx 1$ ГПа оценка дает значение $\delta_\mu \approx 40$ мкм. В том случае, если рассматривается твердое стекло, даже при $p_s - p_y \approx 30$ ГПа критический размер поры будет значительно больше среднего диаметра микробаллонов, использованных в данной работе: $\delta_\mu \gg 60$ мкм.

Оценки на основе сопоставления времени пробега УВ через полость и характерного времени вязкого деформирования дают такой же результат: $t_p \ll t_\mu$. Например, при $u_s = 4$ км/с и $\delta_0 \approx 60$ мкм $t_p = 15$ нс, а $t_\mu \gg 10^{-6}$ с уже при $\mu_s \approx 10^3$ Па·с.

Для определения условий, при которых доминирует тот или иной механизм нагрева поры, в настоящей работе давление УВ изменялось в широком диапазоне. Кроме того, варьировалась вязкость среды, окружающей пору: от вязкости стеклянных микробаллонов, помещенных в твердую эпоксидную смолу, до вязкости тонкостенных полимерных микробаллонов, находящихся в воде, поскольку на процесс сжатия поры влияют характеристики как матрицы, так и материала, из которого изготовлены микробаллоны. В [23] уже проводилась регистрация временных характеристик теплового излучения, генерируемого при ударном сжатии стеклянных микробаллонов, однако в этих исследованиях временное разрешение аппаратуры было недостаточно высоким для регистрации времени формирования ГТ. В данной работе временное разрешение повышено (в отдельных экспериментах до 5 нс) и временные характеристики исследовались подробнее.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты выполняли по двум схемам. В опытах по первой схеме проводили ударно-волновое нагружение образцов, изготовленных из смеси эпоксидной смолы с добавкой 2 % (масс.) стеклянных микробаллонов марки МС-В. Размер основной фракции составлял $58 \div 60$ мкм, толщина стенки $0.5 \div 1$ мкм.

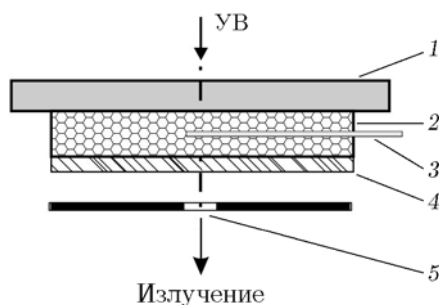


Рис. 1. Схема эксперимента по определению температуры ГТ:

1 — экран, 2 — образец, 3 — манганиновый или PVDF датчик, 4 — окно из плексигласа, 5 — апертура

Микробаллоны равномерно распределялись по объему смолы, образуя «гетерогенный образец» (рис. 1).

В экспериментах по второй схеме (рис. 2) образцом служил монослой микробаллонов, помещенный в прозрачную матрицу — эпоксидный компаунд или воду. Монослой формировали из просеянных микробаллонов МС-В размером $50 \div 75$ мкм или полимерных микробаллонов марки «Ехрancel» с размером основной фракции 40 мкм. Микробаллоны наносили на скотч толщиной 40 мкм в один слой (степень заполнения поверхности скотча микробаллонами контролировали при помощи оптического или электронного сканирующего микроскопа). Для временной привязки импульса излучения к импульсу давления, действующему на мик-

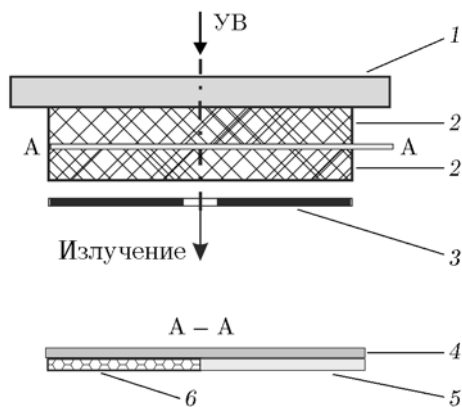


Рис. 2. Схема эксперимента с монослоем микробаллонов:

1 — экран, 2 — прозрачная матрица, 3 — апертура, 4 — скотч, 5 — манганиновый или PVDF датчик, 6 — микробаллоны

робаллоны, на скотч наклеивали либо тонкопленочный пьезоэлектрический датчик давления DYNASEN PVF₂11-.04-ЕК, либо манганиновый датчик DYNASEN MN4-50-ЕК. Эпоксидную смолу в обеих схемах полимеризовали.

Нагружение осуществлялось или металлическими ударниками при давлении в эпоксидном компаунде $9 \div 29$ ГПа, или контактным взрывом ВВ со слоистой системой ослабления для того, чтобы получить давление в диапазоне $0.5 \div 5$ ГПа. Тепловое излучение, возникающее при ударном нагружении образцов, выводилось из взрывной камеры через кварцевые световоды и передавалось на фотоумножители (ФЭУ) или кремниевый детектор излучения. В измерительных каналах устанавливали интерференционные светофильтры на линиях 550 и 630 нм с шириной полосы пропускания 10 и 20 нм соответственно. В ряде экспериментов для улучшения отношения сигнал/шум использовали 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. Подробно использованная методика регистрации излучения при нагружении образцов со стеклянными микробаллонами и определения яркостной температуры описана в [23, 24].

Время, за которое УВ интенсивностью $0.5 \div 30$ ГПа проходит через монослой, составляет $t_p \approx 30 \div 8$ нс. Отсюда следует, что временное разрешение аппаратуры должно быть достаточно высоким, поэтому для регистрации импульсов излучения использовали быстродействующий кремниевый детектор DET210 с временем разрешения 1 нс и два типа фотоумножителей: ФЭУ-36 и ФЭУ-51, которые обладают более высокой чувствительностью, чем детектор. Временное разрешение каналов ФЭУ тестировали путем параллельной регистрации короткого лазерного импульса (длительность импульса 10 нс, время нарастания 5 нс) фотоумножителями и детектором DET210. В результате установлено, что временное разрешение ФЭУ-36 составляет $\Delta t \leq 15$ нс при задержке сигнала в фотоумножителе $\Delta t_1 \approx 52$ нс, для ФЭУ-51 — $\Delta t \leq 35$ нс и $\Delta t_1 \approx 45$ нс соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В первой серии экспериментов оценивалась температура горячих точек в зависимо-

сти от давления в «гетерогенном» образце. При нагружении образца ударной волной одновременно регистрировалось тепловое излучение образца и давление в его центральном сечении. В таком образце проекции ГТ на поверхность раздела образца с окном перекрываются, и при достаточно толстом образце можно полагать, что излучаемая поверхность квазиоднородна и имеет некоторую осредненную светимость. Оценка минимальной толщины образца, при которой в качестве площади свечения можно считать всю площадь, которая вырезается апертурой, дает значение $\delta_{\min} \approx 1$ мм. При такой оценке сделано предположение, что микробаллоны полностью сферически схлопнулись за фронтом УВ, а их поверхность нагрета до средней температуры ГТ. В опытах использовали образцы толщиной $5 \div 10$ мм.

Результаты измерения средней яркостной температуры для смеси эпоксидная смола + микробаллоны приведены на рис. 3. Для сопоставления представлены данные по температуре однородной эпоксидной смолы, полученные в [25]. Сравнение показывает, что температура смеси эпоксидной смолы с микробаллонами во всем диапазоне давления превышает температуру однородной смолы примерно на $(1.0 \div 1.5) \cdot 10^3$ К и падает от 3200 до 1600 К при изменении интенсивности УВ от 29 до 2 ГПа соответственно. Результаты измерения температуры для смеси, очевидно, можно при-

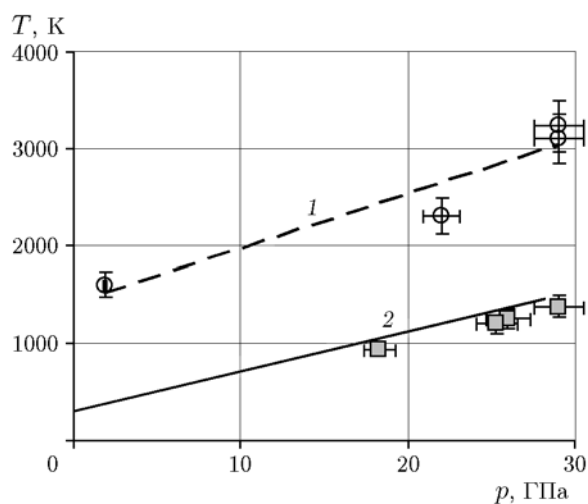


Рис. 3. Зависимость яркостной температуры гетерогенных образцов от давления:

1 — смесь эпоксидная смола + стеклянные микробаллоны, 2 — однородная эпоксидная смола [25]

нять в качестве оценки температуры ГТ.

Во второй серии экспериментов определяли временные характеристики излучения, сопровождающего сжатие монослоя микробаллонов, расположенного в плоскости, перпендикулярной направлению распространения УВ (см. рис. 2). После подхода УВ к монослою амплитуда сигнала излучения по мере деформации пор достигает тех значений, которые могут быть зарегистрированы пирометром. Порог регистрации теплового излучения соответствовал излучению черного тела при $T \approx 10^3$ К. Для контроля проведен эксперимент, в котором УВ воздействовала на ленту скотча без микросфер, — излучение в момент прохождения ленты ударной волной не регистрировалось.

На рис. 4 приведены профили сигналов излучения, полученные при разных условиях нагружения. Передний и задний фронты

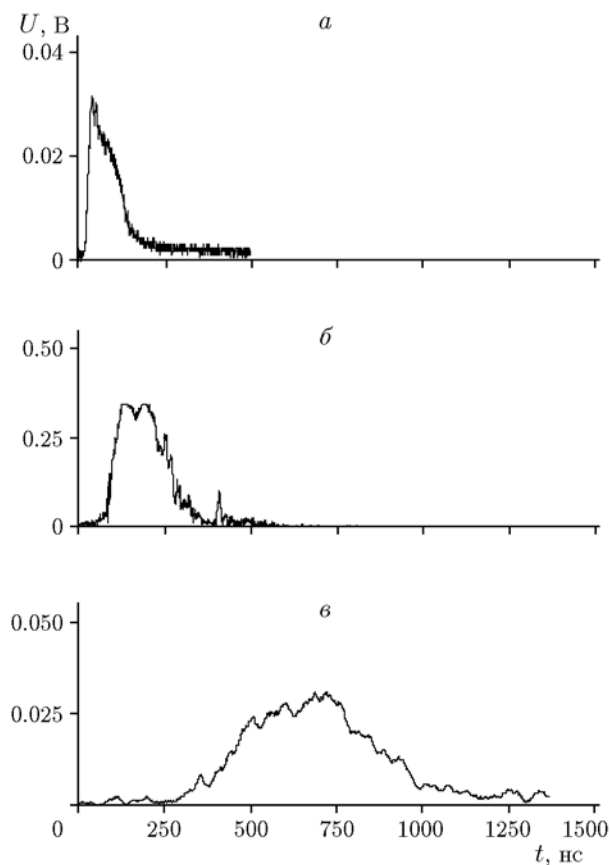


Рис. 4. Профили излучения при различных условиях нагружения:

a — вода + МС-В, $p = 26.6$ ГПа, $\tau_1 = 17$ нс; *б* — эпоксидная смола + МС-В, $p = 2.6$ ГПа, $\tau_1 = 77$ нс; *в* — эпоксидная смола + МС-В, $p = 0.5$ ГПа, $\tau_1 = 300$ нс

сигнала интерпретируются в дальнейшем как время «формирования» (τ_1) и «исчезновения» (τ_2) горячей точки. Соответствие длительности переднего фронта времени образования ГТ вполне естественно, так как вне зависимости от того, какой механизм или их комбинация определяют коллапс микробаллонов, тепловое излучение связано с нагревом материала, окружающего пору, или газа, находящегося внутри ее. При этом предполагается, что фронт УВ плоский и все микробаллоны начинают сжиматься одновременно. Для проверки возможного влияния кривизны фронта УВ или его перекоса относительно плоскости монослоя на увеличение длительности переднего фронта регистрируемого импульса излучения проведены опыты, в которых диаметр апертуры изменялся от 4 до 8 мм. Заметного изменения длительности фронта при уменьшении диаметра отверстия апертуры не обнаружено.

Профиль излучения, зарегистрированный детектором DET210 (рис. 4, *a*), получен при нагружении монослоя стеклянных микробаллонов, находящегося в воде при $p = 26.6$ ГПа. Время коллапса $\tau_1 = 17$ нс, а расчетное время, за которое УВ со скоростью 7.6 км/с или стенка поры, движущаяся с удвоенной массовой скоростью, проходят ее диаметр, составляет ≈ 8 нс. Близость этих времен показывает, что в данном случае основным является гидродинамический режим коллапса.

С уменьшением давления до 2.6 ГПа длительность переднего фронта для монослоя МС-В, находящегося в эпоксидной смоле, возрастает до $\tau_1 = 77$ нс (см. рис. 4, *б*) и, следовательно, вязкость начинает играть важную роль в формировании ГТ. Отметим, что при этом уровне давления на вершине профилей, как правило, наблюдается двойной максимум, что, по-нашему мнению, отражает сложный процесс формирования ГТ. Дальнейшее уменьшение давления до 0.5 ГПа (см. рис. 4, *в*) привело к росту длительности переднего фронта до 300 нс, хотя при этом давлении время пробега УВ через размер поры составляло всего лишь 30 нс. Очевидно, что при этих условиях происходит смена доминирующего механизма разогрева вещества поры — большой вклад дает вязкопластический механизм.

Согласно модели деформирования поры, рассматривавшейся в [14, 17, 18], предполагается, что УВ быстро проходит через пору и после этого начинается ее сферически-

симметричное сжатие. В таком случае следовало бы ожидать, что между началом импульса давления, регистрируемого датчиком, расположенным в одной плоскости с монослоем микробаллонов, и появлением теплового излучения существует некоторое «темное» время, в течение которого реализуется упругая и упругопластическая деформация поры и локальный разогрев не регистрируется (в зависимости от чувствительности аппаратуры). Изменение радиуса эффективно происходит в третьей фазе сжатия, обусловленной пластическим течением, и сопровождается формированием ГТ. Однако эксперименты с высоким временным разрешением не обнаружили «темного» времени в пределах $10 \div 20$ нс при давлении $p_{sh} \approx 2.5$ ГПа. При временной привязке сигналов давления и излучения учитывались задержки в схеме питания манганинового датчика и ФЭУ, а также время пробега сигналов по световоду и радиочастотным кабелям.

Профиль излучения, зарегистрированный при нагружении монослоя полимерных микробаллонов, расположенного в воде, приведен на рис. 5. Поскольку толщина стенки из полимера у этих микробаллонов всего лишь 0.1 мкм, такая постановка эксперимента фактически моделирует сжатие монослоя газовых пузырьков в воде. Несмотря на то, что давление в опыте составляло 1.6 ГПа, длительность фронта оказалась равной 22 нс, в противоположность экспериментам, представленным на рис. 4, б, в. Столь малая длительность фронта свидетельствует о том, что, несмотря на небольшую интенсивность УВ, преобладающим в данном случае является гидродинамический механизм коллапса. Вязкость воды при таких давлениях значительно меньше вязкости твердого стекла

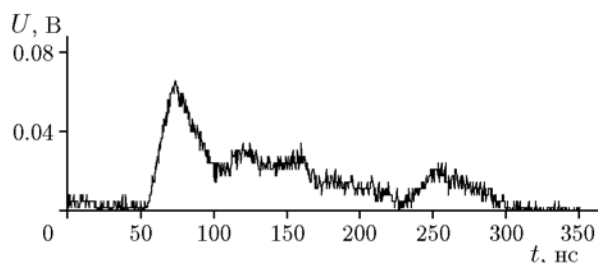


Рис. 5. Профиль излучения при нагружении полимерных микробаллонов (вода + Expancel, $p = 1.6$ ГПа, $\tau_1 = 22$ нс)

и эпоксидной смолы и по оценке [26] составляет $0.16 \cdot 10^{-2}$ Па·с. Вязкопластический механизм в этом опыте практически полностью исключен, поэтому время образования ГТ соответствует времени коллапса полости по гидродинамической модели, так же как и в случае, который показан на рис. 4, а.

На рис. 6 суммированы результаты измерения зависимости τ_1 от давления p_{sh} . Кривые построены для трех типов образцов, параметры которых приведены в таблице. Результаты опытов первой серии, в которой монослой микробаллонов погружен в матрицу из эпоксидной смолы, аппроксимированы кривой 1. Кривая 2 построена для монослоя микробаллонов, находящихся в воде, вязкость которой значительно меньше, чем вязкость твердой эпоксидной смолы, особенно в области низких давлений (вторая серия опытов). В пределах экспериментальной ошибки и разброса данных обе зависимости можно описать степенной функцией вида

$$\tau_1 \approx \frac{a_i}{\sqrt{p_{sh}}} \quad (2)$$

с коэффициентами $a_1 = (5.0 \pm 0.8) \cdot 10^{-3}$ Па^{0.5}·с и $a_2 = (2.8 \pm 0.4) \cdot 10^{-3}$ Па^{0.5}·с для серий опытов 1 и 2 соответственно. Из взаимного расположения кривых 1 и 2 видно, что понижение вязкости матрицы в этом случае привело лишь к незначительному уменьшению длительности

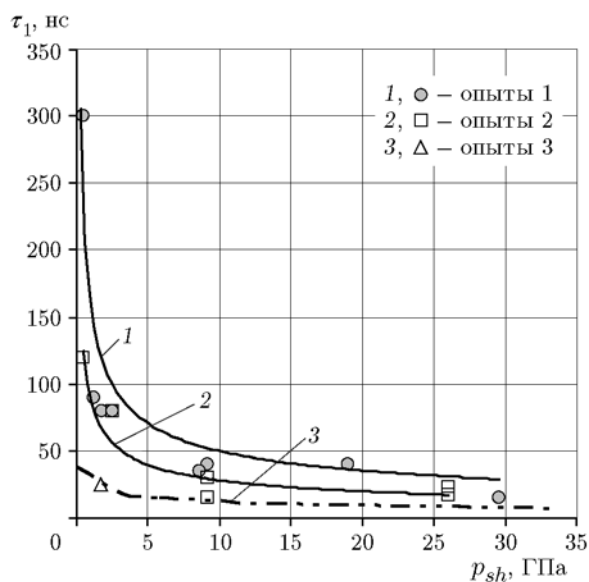


Рис. 6. Экспериментальная зависимость $\tau_1(p_{sh})$

Условия опытов по определению зависимости $\tau_1(p_{sh})$

Серия опытов	Материал матрицы	Состав монослоя	Насыпная плотность, г/см ³	Форма; толщина стенки, мкм; газ
1	Эпоксидная смола	Микробаллоны, стекло МС-В	0.23	Моноячейка; 0.5 ÷ 0.7; азот
2	Вода	Микробаллоны, стекло МС-В	0.23	Моноячейка; 0.5 ÷ 0.7; азот
3	Вода	Микробаллоны, полимер «Exprancel»	0.025	Моноячейка; ≈0.1; изобутан

сжатия. По-видимому, это связано с тем, что в процессе коллапса основную роль играет стеклянная оболочка микробаллонов. Функция (2) дает более слабую зависимость от давления, чем теоретическая оценка времени сжатия сферической полости в вязкой среде (см. выражение (1)). Кроме того, как отмечалось выше, в экспериментах не зафиксировано «темное» время между приходом УВ на монослой и сигналом излучения. Очевидно, это связано с тем, что чисто вязкопластическая модель с симметричным деформированием поры, которая выполняется при условии малых чисел Рейнольдса (или $\delta_0 \ll \delta_\mu$), не имела места в исследованном диапазоне давления.

Кривая 3 соответствует расчетному времени, в течение которого УВ проходит диаметр микробаллона (t_p). Экспериментальная точка (треугольник), полученная в эксперименте с микробаллонами из полимера с толщиной стенки $\delta \approx 0.1$ мкм в воде при $p_{sh} \approx 1.6$ ГПа, совпадает с расчетным значением t_p .

В диапазоне $p_{sh} = 5 \div 29$ ГПа время коллапса τ_1 практически постоянно и всего в 1.5 ÷ 2 раза превосходит t_p , что соответствует гидродинамической модели схлопывания. Однако при $p_{sh} = 0.5 \div 5$ ГПа кривые 1, 2 для стеклянных микробаллонов проходят заметно выше кривой 3, представляющей собой зависимость $t_p(p_{sh})$. Это показывает, что в диапазоне низких давлений, в котором наблюдается резкое увеличение τ_1 по сравнению с t_p , влияние вязкости резко возрастает. Полученная экспериментальная зависимость качественно совпадает с результатами моделирования [16], согласно которым формирование ГТ в этом диапазоне давления состоит из смеси гидродинамического и вязкопластического течений. В дальнейшем представляет интерес проведение подробных исследований в диапазоне давления ниже 1 ГПа, который теоретически рассмотрен в [14] в рамках чисто вязкопластического механизма.

ВЫВОДЫ

В диапазоне давления 2 ÷ 29 ГПа измеренная яркостная температура при ударном сжатии образцов, изготовленных из смеси эпоксидной смолы со стеклянными микробаллонами, значения которой составили 1600 ÷ 3200 К соответственно.

Проведена регистрация временных характеристик импульсов излучения, возникающих при ударном нагружении монослоя стеклянных или полимерных микробаллонов в диапазоне давления 0.5 ÷ 29 ГПа при различной вязкости материала, окружающего пору.

Длительность переднего фронта импульса излучения, соответствующего времени формирования горячей точки, возрастает от $2 \cdot 10^{-8}$ до $30 \cdot 10^{-8}$ с в зависимости от интенсивности ударной волны и вязкости материала, окружающего пору. Анализ полученных данных показал, что в диапазоне давления 5 ÷ 29 ГПа основную роль в формировании горячих точек играет гидродинамический механизм коллапса. В диапазоне 0.5 ÷ 5 ГПа начинает играть роль вязкопластический механизм.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Боуден Ф. П., Иоффе А. Д.** Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких веществах. — М.: Изд-во иностр. лит., 1955.
2. **Mader C. L.** Numerical Modeling of Detonations. — Berkeley: Univ. of California, 1979.
3. **Mader C. L., Kershner J. D.** The three-dimensional hydrodynamic hot-spot model // Proc. Eighth Symp. on Detonation. — 1985. — P. 42–52.
4. **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.
5. **Bourne N. K., Field J. E.** Shock-induced collapse of single cavities in liquids // J. Fluid Mech. — 1992. — V. 244. — P. 225–240.

6. **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.
7. **Bourne N. K.** On the collapse of cavities // Shock Waves. — 2002. — V. 11, N 6. — P. 447–455.
8. **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.
9. **Starkenberг J.** Ignition of solid high explosive by the rapid compression of an adjacent gas layer // Proc. Seventh Symp. on Detonation. — 1982. — P. 3–16.
10. **Frey R. B.** Cavity collapse in energetic materials // Proc. Eighth Symp. on Detonation. — 1985. — P. 68–80.
11. **Dear J. P., Field J. E., Walton A. J.** Gas compression and jet formation in cavities collapsed by a shock wave // Nature. — 1988, April. — V. 332. — P. 505–508.
12. **Афанасьев Г. Т., Боболев В. К., Казарова Ю. А., Карабанов Ю. Ф.** Образование локальных разогревов в процессе разрушения тонких слоев при ударе // Физика горения и взрыва. — 1972. — Т. 8, № 2. — С. 299–306.
13. **Frey R. B.** The initiation of explosive charges by rapid shear // Proc. Seventh Symp. on Detonation. — 1982. — P. 36–42.
14. **Khasainov B. A., Borisov A. A., Ermolaev B. S., Korotkov A. I.** Two-phase visco-plastic model of shock initiation of detonation in high density pressed explosives // Proc. Seventh Symp. on Detonation. — 1982. — P. 435–447.
15. **Механика в СССР за 50 лет. Т. 2: Механика жидкости и газа / под ред. Л. И. Седова, Я. Б. Зельдовича, А. Ю. Ишлинского и др.** — М.: Наука, 1970.
16. **Tran L., Udaykumar H. S.** Simulation of void collapse in an energetic material. Pt 1: Inert case // J. Propul. Power. — 2006. — V. 22, N 5. — P. 947–958.
17. **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. — P. 117–139.
18. **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.
19. **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.
20. **Дубовик А. В., Боболев В. К.** Чувствительность жидких взрывчатых систем к удару. — М.: Наука, 1978.
21. **Колганов Е. Б., Соснин В. А.** Эмульсионные промышленные взрывчатые вещества. — Дзержинск: ГосНИИ «Кристалл», 2009.
22. **<http://www.stroitelstvo-new.ru/steklo/steklomassa.shtml>**.
23. **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.
24. **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.
25. **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.
26. **Альтшулер Л. В., Канель Г. И., Чекин Б. С.** Новые измерения вязкости воды за фронтом ударных волн // ЖЭТФ. — 1977. — Т. 72, вып. 2. — С. 663–666.

Поступила в редакцию 15/IV 2015 г.