

## НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ УДАРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРОЗРАЧНЫХ СРЕД

М. А. Бражников, М. Ф. Гоголя

Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, 119991 Москва, gogul@polymer.chph.ras.ru

Исследовалось излучение ударно-сжатой воды в диапазоне давлений  $10,0 \div 39,5$  ГПа, нагружаемой через преграды из различных металлов (Al, Mg, Cu). Показано, что интенсивность излучения зависит как от давления ударного сжатия, так и от природы металла. При давлениях ниже 25 ГПа в области прозрачности воды интенсивность излучения существенно превосходит предполагаемый уровень теплового излучения. Обнаруженный эффект отчасти может быть объяснен взаимодействием материала преграды с водой, а также нетепловым излучением ударно-сжатой воды. Для сравнения приведены некоторые экспериментальные данные по ударно-индуцированному излучению ряда прозрачных материалов (оптическое стекло «Крон-8», глицерин, хлорид натрия).

Ключевые слова: ударное сжатие, вода, температура, люминесценция, излучение, прозрачные среды.

### ВВЕДЕНИЕ

Вода является одним из уникальных соединений. Ее свойства и параметры состояния при нормальных и экстремальных условиях (например, при ударном сжатии) привлекают внимание исследователей. Одним из наиболее важных термодинамических параметров вещества является температура. Для определения температуры ударно-сжатой воды применялись различные экспериментальные методы [1–5], полученные данные представлены на рис. 1.

Вода прозрачна при давлениях ударного сжатия до 30 ГПа [6, 7], но, как можно видеть из рис. 1, ее температура в этом диапазоне ранее не измерялась. Излучение ударно-сжатых веществ, сохраняющих свою прозрачность (частичную прозрачность), представляет собой важную проблему фундаментальных и прикладных исследований. Так, для измерения температур непрозрачных сред, проводимого с помощью оптической пирометрии, необходимы «окна» с известными характеристиками излучения [8].

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В настоящей работе исследовалось излучение ударно-сжатой воды в диапазоне давлений

$p = 10,0 \div 39,5$  ГПа. Толщина слоя варьировалась от 7 до 30 мм. Ударные волны (УВ) в воде создавались при ударе по металлической преграде пластины, разогнанной продуктами детонации ВВ или расширяющимися продуктами детонации (соответственно «метательная» и «контактная» постановки). Плосковолновой генератор из флегматизированного гексогена инициировал заряд высотой 60 мм и диаметром 40 мм. Преграды изготавливались из трех металлов (Al, Cu, Mg) с одинаковой обработкой (шероховатостью) поверхности. Давление в воде определялось с использованием ударной адиабаты металлов и ударной адиабаты воды:

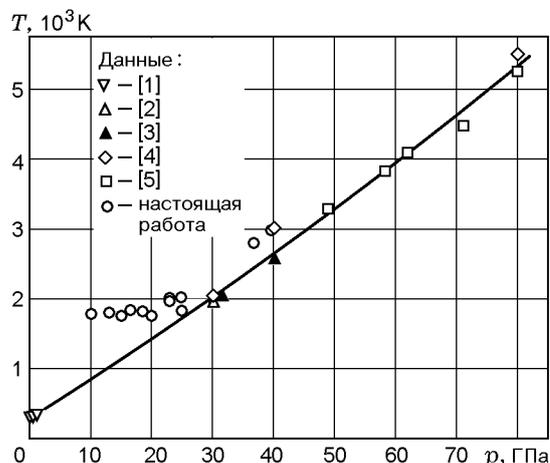


Рис. 1. Температура ударно-сжатой воды

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (номер проекта 01-03-32729а).

Таблица 1

Условия проведения опытов по ударному сжатию воды

Заряд ВВ*	Толщина ударника**, мм	Преграда		Давление, ГПа
		материал	толщина, мм	
«Контактная» постановка опытов				
ТНТ (1,61)	—	Al	2,95	10,0
ТНТ/гексоген 50/50 (1,67)	—	Al	2,77	13,3
Октоген (1,80)	—	Al	2,90	18,7
«Метательная» постановка опытов				
ТНТ (1,61)	1,96	Al	0,90	15,2
Гексоген (1,71)	1,94	Cu	0,99	16,7
ТНТ/гексоген 50/50 (1,67)	1,87	Al	0,50	20,0
Гексоген (1,71)	1,90	Al	0,90	23,0
Октоген (1,80)	0,95	Cu	0,99	24,8
	1,94	Al	0,98	25,1
	0,95	Al	0,48	36,7
	1,00	Mg	1,86	39,5

Примечание. \*В скобках указана плотность ВВ в г/см<sup>3</sup>, \*\*материал ударника — алюминий.

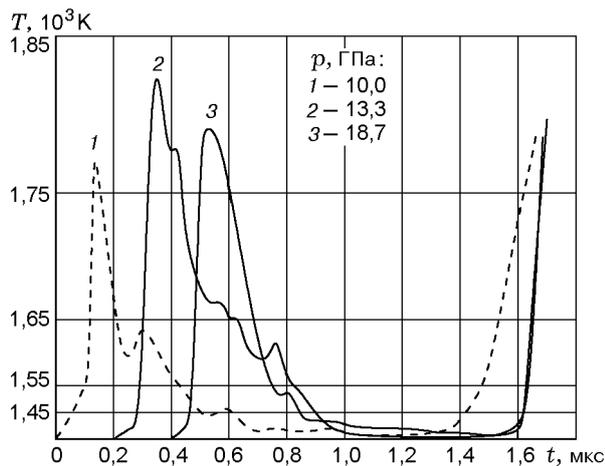


Рис. 2. Профили излучения воды ( $\lambda_{eff} = 720$  нм): «контактная» постановка опытов; материал преграды — алюминий; кривые 2 и 3 смещены во времени соответственно на 0,2 и 0,4 мкс от начала записи

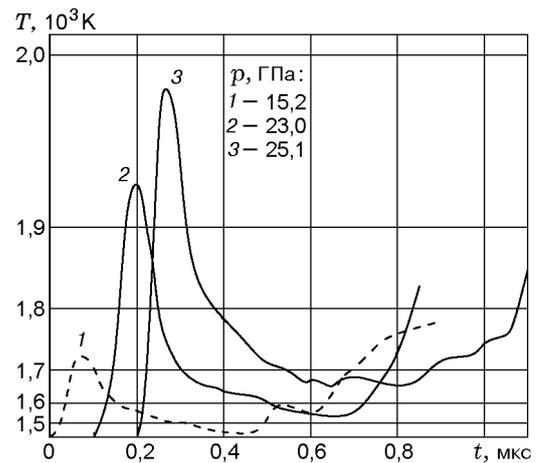


Рис. 3. Профили излучения воды ( $\lambda_{eff} = 720$  нм): «метательная» постановка опытов; материал преграды — алюминий; кривые 2 и 3 смещены во времени соответственно на 0,1 и 0,2 мкс от начала записи

Таблица 2  
Температура и коэффициенты  
поглощения стекла «Крон-8»

$p$ , ГПа	$T$ , К	$K_s$ , $\text{мм}^{-1}$
19,4	1720	$0,80 \pm 0,05$
23,3	2150	$1,2 \pm 0,1$
29,2	2430	$1,9 \pm 0,1$
31,8	2620	$2,5 \pm 0,2$

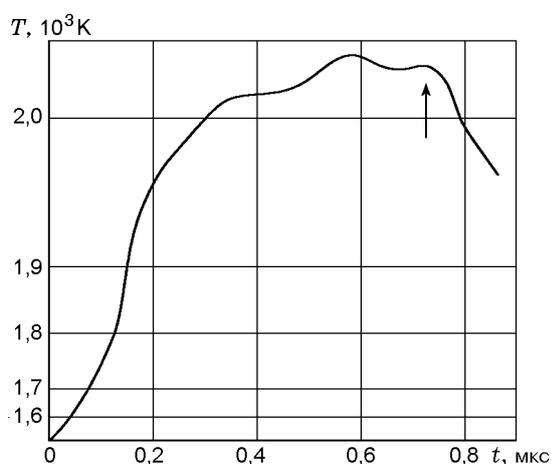


Рис. 4. Профиль излучения стекла ( $\lambda_{eff} = 720$  нм) при  $p = 23,0$  ГПа:

«контактная» постановка опытов; стрелкой показан момент прихода волны разрежения

$D = 1,593 + 1,8u$ , где  $0,170 < u < 1,973$  км/с, и  $D = 2,607 + 1,286u$ , где  $u > 1,973$  км/с [9]. Параметры нагружающих систем определялись в предварительных опытах. Условия проведения экспериментов приведены в табл. 1.

Излучение регистрировалось двухканальным оптическим пирометром с временным разрешением  $\approx 20$  нс. Измерения проводились на длине волны  $\lambda_{eff} = 720$  нм при  $p < 25$  ГПа и на двух длинах волн ( $\lambda_{eff} = 420$  и  $720$  нм) при более высоких давлениях. Наименьшая интенсивность излучения, регистрируемая пирометром, соответствовала температуре 1300 К.

Результаты опытов с преградами из алюминия показаны на рис. 2, 3. Для сравнения интенсивность излучения здесь и далее приведена в единицах яркостных температур. Профилям излучения, полученным при различных давлениях, присущи общие черты. Прежде всего, это резкое нарастание интенсивности в момент выхода УВ на границу алюминий — вода.

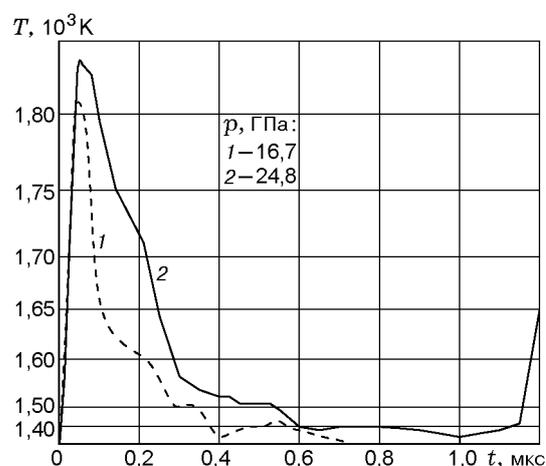


Рис. 5. Профили излучения воды ( $\lambda_{eff} = 720$  нм):

«метательная» постановка опытов; материал преграды — медь

Такой характер не согласуется с тем, что можно было ожидать при тепловом излучении частично прозрачной среды, вызванном распространением УВ. При этом возрастает толщина излучающего слоя и наблюдается поступательное нарастание сигнала во времени. Такие записи регистрировались при ударном нагружении оптического стекла «Крон-8» [10] и ряда других веществ [3, 11]. Профиль теплового излучения стекла, представленный на рис. 4, получен при том же давлении, что и для воды (см. кривую 2 на рис. 3). Видно, что обе записи различаются не только интенсивностью излучения (что легко объяснить различием материалов), но и формой кривых. Характер нарастания интенсивности излучения в ударно-сжатом стекле во времени позволяет определить коэффициент поглощения (см. табл. 2), значение которого возрастает с увеличением давления ударного сжатия. Другая общая черта регистраций (см. рис. 2 и 3) заключается в высоком уровне яркостных температур, значительно превышающем ожидаемый (см. рис. 1). Однако увеличение давления ударного сжатия от 10,0 до 25,1 ГПа не приводит к адекватному росту температуры; наблюдается только увеличение длительности пика излучения. Таким образом, можно предположить, что излучение, фиксируемое в пределах нескольких десятых микросекунды, носит сложный, нетепловой характер.

Эксперименты, результаты которых представлены на рис. 2 и 3, различаются поста-

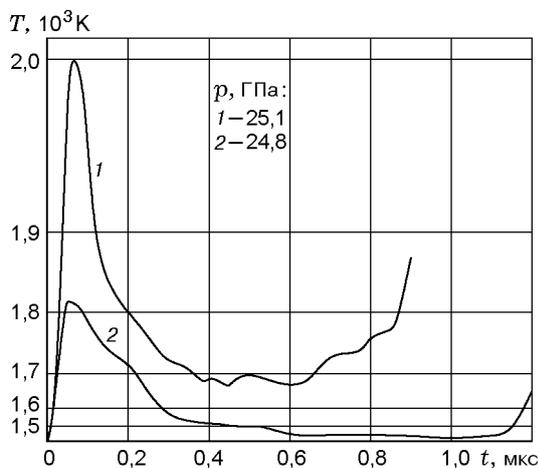


Рис. 6. Профили излучения воды ( $\lambda_{eff} = 720$  нм):

«метательная» постановка опытов; материал преграды: 1 — Al, 2 — Cu

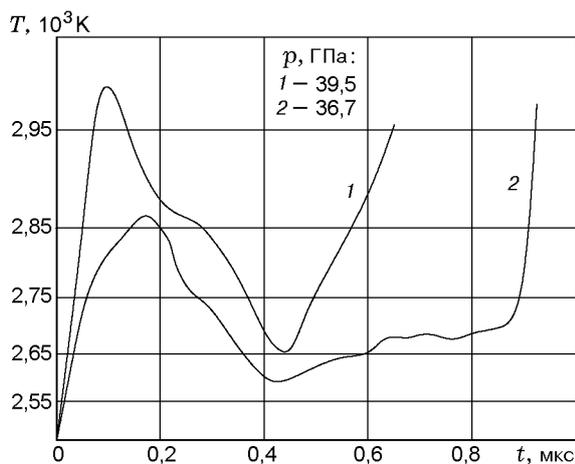


Рис. 7. Профили излучения воды ( $\lambda_{eff} = 420$  нм):

«метательная» постановка опытов; материал преграды: 1 — Mg, 2 — Al

новкой. В первой серии опытов постановка была «контактной», во второй — «метательной». Момент окончания регистрации излучения в воде определяется выходом ударной волны на контактную границу вода — воздух. Он сопровождается резким нарастанием излучения в воздухе, которое значительно превосходит измеряемое. В результате луч на экране осциллографа выходит за пределы линейной области. При «метательной» постановке (см. рис. 3) второй подъем сигнала наблюдается значительно раньше, чем ожидалось. Более того, при давлениях 23,0 и 25,1 ГПа излучение первого пика

падает не до «нуля» (минимального уровня, регистрируемого установкой), а до «плато», соответствующего температурам 1500 ÷ 1700 К (см. кривые 2 и 3 на рис. 3). Для опытов в «метательной» постановке можно предположить наличие микроотколов алюминия на контактной поверхности алюминий — вода. Микрочастицы алюминия могут активно реагировать с водой, приводя к наблюдаемому подъему температуры. Чтобы проверить это предположение, было проведено несколько опытов с медной преградой при разных давлениях (рис. 5). Характер кривых на рис. 5 тот же, что и в случае алюминиевой преграды. Повышение давления ударного сжатия (от 16,7 до 24,8 ГПа) также приводит только к увеличению ширины пика, однако вторичный подъем излучения, вызванный выходом УВ в воздух, наблюдается в пределах ожидаемого времени.

Из сравнения профилей излучения, полученных для исследованных металлов практически при одних и тех же условиях ударного нагружения (24,8 и 25,1 ГПа, см. рис. 6) ясно видна роль материала преграды. В случае алюминия интенсивность излучения выше. При использовании медной преграды излучение падает до минимальной интенсивности в пределах первых 0,6 мкс, в то время как при алюминиевой преграде оно начинает возрастать. В обоих опытах время распространения УВ по воде было оценено величиной  $\approx 1$  мкс (без учета ослабления волны), что и наблюдалось в действительности для медной преграды (см. рис. 6).

Таким образом, в экспериментах, проведенных в «метательной» постановке с алюминиевой преградой при  $p = 10,0 \div 25,1$  ГПа, вторичный подъем излучения может быть обусловлен реакцией алюминия с водой.

Было проведено также два опыта с преградами из Al и Mg, при значениях  $p$ , отличающихся на 7 % (рис. 7). Более интенсивное излучение зарегистрировано в случае преграды из Mg, наблюдается резкое нарастание излучения вблизи контактной границы с водой. Начало второго подъема регистрируется в пределах одного и того же времени (0,4 мкс) для обоих металлов, но в случае химически активного Mg излучение нарастает заметно быстрее. Оно начинает возрастать, когда УВ распространяется по воде и еще не достигает контактной границы вода — воздух.

Сравнивая профили излучения в экспериментах, проведенных в одной и той же поста-

новке с преградами из Cu, Al и Mg, можно прийти к выводу, что вода и химически активные металлы (Al, Mg) способны реагировать в диапазоне  $p = 10 \div 40$  ГПа. Ранее реакция воды с порошком алюминия наблюдалась при низких давлениях ударного сжатия [12], однако характерное время развития реакции было оценено величиной порядка нескольких десятков микросекунд, а температура — около 2000 К.

Более сложным представляется характер излучения, фиксируемого в пределах  $0,1 \div 0,3$  мкс от начала записи. Излучение возникает в момент прохождения ударной волной контактной границы двух материалов (не обязательно реакционноспособных), когда волна входит в прозрачное вещество, например, полиметилметакрилат (ПММА), глицерин, сапфир, хлорид натрия [13–15]. Его интенсивность зависит от природы контактирующих материалов, давления ударного сжатия и обработки поверхностей (поэтому в настоящей работе были выбраны преграды с одной и той же чистой обработкой поверхности). Прохождение УВ через контактную границу с металлом сопровождается не только резким подъемом излучения, но и возбуждением ЭДС. Для одного и того же прозрачного вещества величина ЭДС зависит от материала преграды [16, 17]. Излучение, прозрачность и электропроводность конденсированного вещества при ударном сжатии взаимосвязаны. Из анализа данных для воды, представленных на рис. 1, видно, что когда давление ударного сжатия достигает 40 ГПа, температура ударно-индуцированного излучения приближается к уровню теплового. Установлено [18, 19] также, что электропроводность воды резко возрастает при увеличении давления в диапазоне  $10 \div 30$  ГПа, затем она практически не меняется до давления 60 ГПа. Такое поведение вещества предшествует потере прозрачности. Можно сказать, что вода непрозрачна при  $p > 50$  ГПа, а при  $p = 30,0 \div 40,0$  ГПа частично прозрачна. Ударная адиабата воды состоит из двух прямых линий и имеет излом в области  $p = 9,0 \div 11,5$  ГПа [9]; причем не существует экспериментальных данных в диапазоне  $p = 14 \div 29$  ГПа [9, 19]. Хотя трудно ожидать какого-либо отклонения в ходе ударной адиабаты в этой области, необходимо иметь более полную информацию о поведении ударно-сжатой воды, чтобы исследовать возможные причины нетеплового излучения.

Из анализа полученных профилей следу-

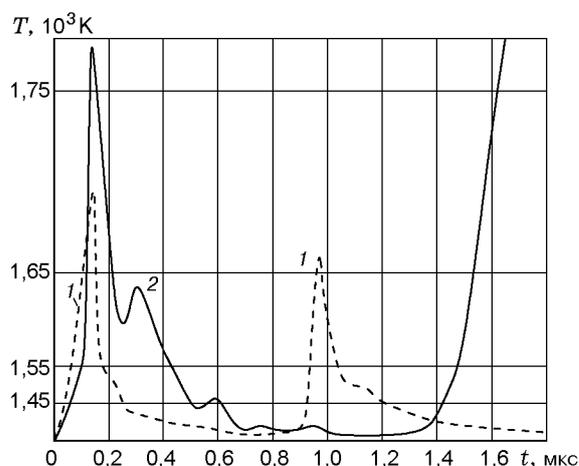


Рис. 8. Профили излучения ( $\lambda_{eff} = 720$  нм), полученные при распространении УВ по «сборке», состоящей из глицерина (15 мкм) + ПММА (5 мм) + глицерин (13 мм) (кривая 1), и по воде (кривая 2), материал преграды — алюминий

ет, что интенсивность излучения определяется «контактным» излучением, обусловленным процессами вблизи контактной границы преграда — вода; «объемным» излучением, испускаемым слоем ударно-сжатой прозрачной или полупрозрачной воды, а также излучением, обусловленным химической реакцией. При распространении УВ по веществу, сохраняющему относительную прозрачность, термодинамическая температура которого не слишком высока, имеет место наложение «контактного» и «объемного» излучений. В подтверждение этого предположения ниже приведены результаты анализа профилей излучения некоторых ударно-сжатых прозрачных материалов.

## 2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

### 2.1. «Контактное» излучение

Чтобы проиллюстрировать роль контактирующих материалов, был проведен опыт, в котором УВ последовательно входила в Al, ПММА (толщина слоя 5 мм), глицерин ( $\approx 13$  мм). Тонкий слой глицерина ( $\approx 15$  мкм) помещался также между Al и ПММА. Полученный профиль излучения представлен на рис. 8. Для сравнения приведен профиль излучения воды, помещенной на алюминиевую пластину. Обе экспериментальные сборки нагружались от заряда ТНТ ( $\rho_0 = 1,61$  г/см<sup>3</sup>).

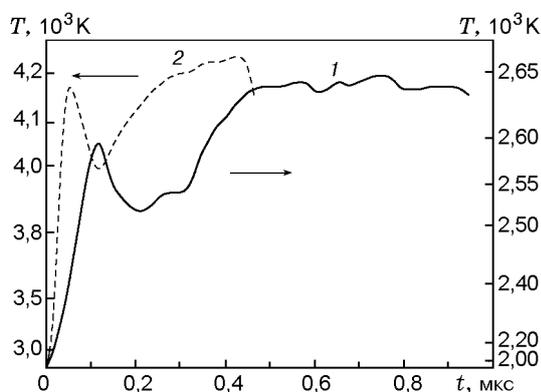


Рис. 9. Профили излучения ( $\lambda_{eff} = 420$  нм) ударно-сжатого NaCl ( $p = 28,5$  ГПа):

1 — пресованный образец, 2 — монокристалл; материал преграды — алюминий

Ударные адиабаты воды, ПММА и глицерина лежат достаточно близко на  $p - u$ -диаграмме. Таким образом, оба профиля регистрировались примерно при одном и том же давлении. Очевидно, что характер излучения «сборки» значительно более сложный. Прохождение УВ через обе контактные границы (Al/ПММА и ПММА/глицерин) сопровождается возникновением пика излучения. Измеренная интенсивность составила  $\approx 1600$  К (см. кривую 1 на рис. 8). Второй пик соответствует моменту входа УВ в глицерин из ПММА. Его величина меньше по сравнению с первым пиком. Это может быть связано с ослаблением УВ и различием материалов. Большая ширина второго пика, возможно, обусловлена излучением ударно-сжатого глицерина.

Остается открытым вопрос, возникает ли «контактное» излучение на поверхности преграды или в самом прозрачном материале в непосредственной близости от границы раздела сред. Чтобы ответить на него, рассмотрим данные по ударно-индуцированному излучению хлорида натрия при  $p = 28,5$  ГПа: монокристалла толщиной 5 мм и пресованного образца толщиной 3 мм (пористость менее 2 %). Записи, полученные в [14], приведены на рис. 9. При этом давлении монокристалл NaCl прозрачен [20]. Заметно большая интенсивность, измеренная в случае пресованного образца, объяснялась его чрезвычайно высокой дефектностью. Существенная деталь, на которую следует обратить внимание, заключается в том, что интенсивность «контактного» из-

лучения соответствует измеряемому «объемному» излучению. Это означает, что «контактное» излучение, вызванное процессами, сопровождающими прохождение УВ через «разрыв» сред на контактной границе Al–NaCl, возникает в слое ударно-сжатого хлорида натрия вблизи контактной границы. Если бы это было не так, то первый пик был бы одной и той же интенсивности как для кристаллического, так и для поликристаллического образца. Можно предположить, что вывод, сделанный для «контактного» излучения хлорида натрия, справедлив также для излучения ударно-сжатых жидкостей, т. е. излучение, регистрируемое при ударном сжатии жидкости при прохождении ударной волной границы раздела сред, локализовано в слое самой жидкости вблизи контактной границы. Ниже на примере глицерина показано, как трансформируется регистрируемый профиль, когда с повышением давления «контактное» излучение экранируется более мощным излучением, возникающим в объеме.

## 2.2. «Объемное» излучение

Если предположить, что люминесценция, регистрируемая через  $\approx 0,1$  мкс после прихода УВ в вещество, вызвана излучением самой среды, то тенденция увеличения длительности свечения с ростом давления (как это было установлено для воды) становится понятной. При использовании химически активных металлов в качестве преград эта тенденция может быть объяснена развитием химической реакции, однако такое объяснение не является удовлетворительным для неактивных металлов. В последнем случае интенсивность излучения также превосходит ожидаемое тепловое.

Для объяснения природы нетеплового излучения использовались результаты теоретических и экспериментальных исследований [21–24]. В общем случае природа нетеплового излучения обусловлена неравновесным выделением (перераспределением) энергии УВ на дефектах структуры вещества. Когда говорят о дефектах, имеют в виду, прежде всего, дефекты в твердых телах, на которых локализована определенная энергия. Структура жидкости характеризуется ближним порядком в распределении молекул, а также флуктуациями плотности и ориентации, которые становятся особенно существенными в случае многоатомных

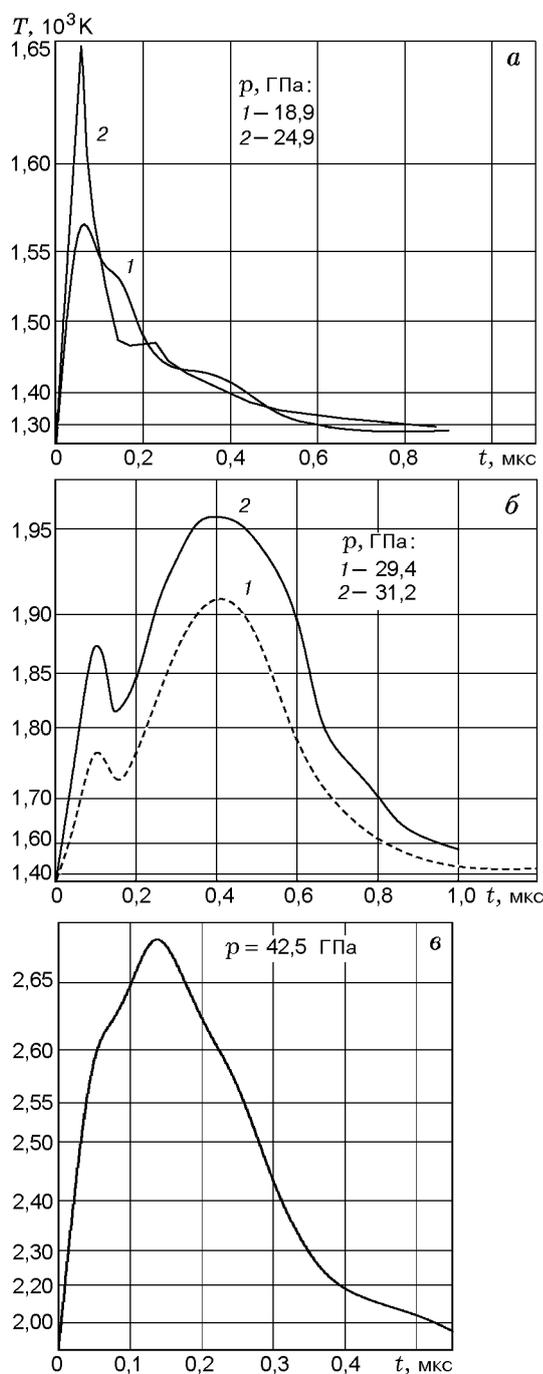


Рис. 10. Профили излучения ударно-сжатого глицерина ( $\lambda_{eff} = 720$  нм): материал преграды — алюминий

веществ. Если молекулярное поле многоатомной жидкости обладает значительной степенью неоднородности (например, при наличии водородной связи), то при описании структуры необходимо учитывать также и ассоциацию молекул. Идеальные жидкости, как и идеальные кристаллы, являются скорее моделью, чем реальностью. Реальные жидкости представляют собой растворы газов, жидкостей и твердых тел, причем смещение происходит на молекулярном уровне. Следовательно, структура жидкости усложняется за счет флуктуаций концентрации и возможных процессов сольватации. В макроскопически однородной (гомогенной) жидкости дефектами структуры являются примеси и растворенные газы, а также флуктуации плотности и ориентации. Однако энергия, запасаемая на таких дефектах, заметно меньше энергии дефектов твердого тела. Помимо этого, примеси и газы могут находиться в жидкости в виде включений — макроскопических неоднородностей. Наличие таких дефектов характерно для границы раздела сред, поэтому интенсивность описанного выше «контактного» излучения зависит от чистоты обработки металлической преграды. При повышении давления до нескольких тысяч атмосфер растворимость газов в жидкости может падать [25]. При этом в условиях ударного сжатия в жидкости возникают условия для образования газовых включений. Рассматривая возникновение кавитации при нормальных условиях как образование новой фазы, Я. Б. Зельдович [26] оценил время образования «жизнеспособного» зародыша, т. е. такого зародыша, рост которого приведет к появлению макроскопического включения, как  $10^{-10}$  с. Такие «зародыши» новой фазы также можно рассматривать как микродефекты структуры, порожденные УВ. Указанные дефекты могут служить центрами излучения ударно-сжатых жидкостей в области их прозрачности. Они являются местом локализации нетеплового излучения, но не его причиной. В силу неравновесного характера УВ, даже в отсутствие примесей и растворенных газов, УВ может найти другой путь для высвобождения нетепловой энергии. Вклад излучения в общее энерговыделение пренебрежимо мал, но в особых случаях, таких, например, как инициирование детонации, оно может играть существенную роль [27]. Так, деионизация и дегазация жидкости, предвещающая опыты по ударному сжатию, как это было сделано

для нитрометана, привели к ослаблению излучения, предшествующего формированию детонации, но не к полному исчезновению этого излучения [28, 29].

Изучая природу «объемного» нетеплового излучения, рассмотрим, как его профиль меняется с давлением. С этой целью проанализируем данные по ударно-сжатому глицерину [15] (профили излучения публикуются впервые). Были выбраны записи опытов (см. рис. 10), проведенных в «метательной» постановке с алюминиевыми преградами, давление изменялось в диапазоне  $18,9 \div 45,2$  ГПа.

Для их анализа использовались результаты измерений показателя преломления ударно-сжатого глицерина, полученные с применением нескольких методик в диапазоне  $p = 5,9 \div 40,9$  ГПа [30–32]. Согласно этим данным глицерин следует рассматривать как прозрачную или частично прозрачную среду. В диапазоне  $p = 5 \div 25$  ГПа зависимость показателя преломления от давления или массовой скорости можно представить как линейную. Однако при более высоких давлениях наклон этих зависимостей существенно уменьшается [32] и они имеют излом в области  $p = 25 \div 30$  ГПа. При  $p < 25$  ГПа зависимость, полученная из уравнения Гладстона — Дэйла [31, 32], хорошо аппроксимирует экспериментальные значения показателя преломления. Явные отклонения от уравнения возникают при более высоких давлениях [32].

Сравнивая полученные профили, можно видеть, что записи при  $p = 24,9, 29,4$  и  $45,2$  ГПа качественно отличаются. При  $p < 25$  ГПа (см. рис. 10, а) излучение вызвано в основном процессами вблизи контактной границы, а «объемное» излучение пренебрежимо мало. Интенсивность излучения незначительно изменяется с давлением, эффект аналогичен поведению ударно-сжатой воды.

Двухпиковые записи излучения были получены при  $p = 29 \div 31$  ГПа (см. рис. 10, б). Природа первого пика та же, что и при низких давлениях. Можно предположить, что второй пик связан с нарастающим слоем ударно-сжатого глицерина. Одно из возможных объяснений заключается в том, что ударно-сжатый глицерин частично теряет прозрачность и «объемное» излучение имеет тепловую природу. Возможно, что в период времени  $0,1 \div 0,2$  мкс «контактное» нетепловое излучение и «объемное» (возможно, тепловое) излучение накладываются

друг на друга, приводя к сложной картине излучения. Трансформация профиля излучения с давлением коррелирует с изменениями поведения показателя преломления. При более высоких давлениях ( $p = 45,2$  ГПа, см. рис. 10, в) глицерин, видимо, практически непрозрачен, первый пик и второй подъем излучения сливаются вместе в пределах первых  $0,05$  мкс.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вода, глицерин, хлорид натрия являются материалами, различающимися физическими и химическими свойствами. Для объяснения превышения измеряемого излучения над ожидаемым тепловым уровнем в ударно-сжатом частично прозрачном хлориде натрия были выдвинуты различные предположения [3, 22, 24]. В соответствии с [3, 24] регистрируемое излучение вызвано совместным действием электрического поля, генерируемого УВ, и донорных центров (дефектов), формирующихся на фронте. Другое объяснение дано в [22]. Высокую интенсивность излучения связывали с фазовым переходом при высоком давлении и полагали, что измеряемая температура — температура плавления. Очевидно, что эти объяснения не согласуются друг с другом. Сравнимая записи, полученные для ударно-сжатых воды, глицерина и хлорида натрия (см. рис. 5 и 10, а; рис. 9 и 10, б; рис. 7 и 10, в), можно увидеть в них некоторую аналогию, несмотря на различие материалов. Нетепловое излучение, вызванное УВ, следует рассматривать как результат необратимого неравновесного характера динамического нагружения. Таким образом, должен быть некоторый общий подход к объяснению природы ударно-индуцированного излучения в гомогенной прозрачной среде и его трансформации с давлением. Проведенные исследования могут рассматриваться как шаг на пути уточнения понимания природы излучения, возникающего при ударном сжатии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Justus B. J., Huston A. L., Campilo A. J.** Temperature measurements of shocked water using a fluorescence probe // *Shock Waves in Condensed Matter-1985* / Y. M. Gupta (Ed.) New York and London: Plenum Press, 1986. P. 249–254.
2. **Воскобойников И. М., Богомолов В. М.** Сравнительное исследование уравнений состо-

- жания продуктов взрыва и органических жидкостей // Теплофизика высоких температур. 1970. Т. 8, № 1. С. 81–87.
3. **Кормер С. Б.** Оптические исследования ударно-сжатых диэлектриков // Успехи физ. наук. 1968. Т. 94, № 4. С. 641–687.
  4. **Ross M. and Nellis W. J.** Equation of experiments and theory relevant to modelling the major planets // Shock Waves in Condensed Matter-1981 / W. J. Nellis, L. Seaman, R. A. Graham (Eds). New York: Amer. Inst. of Physics, 1982. P. 226–230.
  5. **Lyzenga G. A., Ahrens T. J., Nellis W. J., Mitchel A. C.** The temperature of shock-compressed water // J. Chem. Phys. 1982. V. 76, № 12. P. 6282–6286.
  6. **Зельдович Я. Б., Кормер С. Б., Сеницын М. В., Юшко К. Б.** Исследование оптических свойств прозрачных веществ при сверхвысоких давлениях // Докл. АН СССР. 1961. Т. 138, № 6. С. 1333–1336.
  7. **Holmes N. C., Nellis W. J., Graham W. B., Walrafen G. E.** Raman spectroscopy of shocked water // Shock Waves in Condensed Matter-1985 / Y. M. Gupta (Ed.) New York and London: Plenum Press, 1986. P. 191–200.
  8. **Gogulya M. F. Dolgoborodov A. Yu., and Brazhnikov M. A.** Investigation of shock and detonation waves by optical pyrometry // Hyper Velocity Symposium (HVIS), 1998; Intern. J. Impact Engineering. 1999. V. 23. P. 283–293.
  9. **Шарипджанов И. И., Альтшулер Л. В., Брусникин С. Е.** Аномалии ударной и энтропической сжимаемости воды // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 5. С. 149–153.
  10. **Гогоуля М. Ф., Долгобородов А. Ю., Бражников М. А.** Оконная методика определения температуры при ударном сжатии и детонации конденсированных веществ // Тезисы докл. XI Междунар. конф. «Уравнения состояния вещества». Нальчик: КБГУ, 1996. С. 29–30.
  11. **Kondo S. K., and Sawaoka A.** Shock temperatures in fused silica measured by optical technique // J. Appl. Phys. 1982. V. 53, N 6. P. 4512–4514.
  12. **Lee W. M., Demske D. L., and Miller P. J.** Optically measured temperature profile of a condensed aluminum-water medium undergoing a fast chemical reaction // Shock Compression of Condensed Matter-1991 / S. C. Schmidt, R. D. Dick, J. W. Forbes, D. G. Tasker (Eds). North-Holland; Amsterdam; London; New York; Tokyo: Plenum Press, 1992. P. 741–744.
  13. **Urtiew P. A.** Effect of shock loading on transparency of sapphire crystals // J. Appl. Phys. 1974. V. 45, N 8. P. 3490–3493.
  14. **Гогоуля М. Ф., Бражников М. А.** Сравнительные характеристики люминесцентного излучения кристаллических и поликристаллических образцов NaCl // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 4. С. 37–39.
  15. **Воскобойников И. М., Гогоуля М. Ф.** Превращение спиртов разной основности при динамических нагрузках // Хим. физика. 1988. Т. 7, № 9. С. 1268–1273.
  16. **Минеев В. Н., Иванов А. Г.** Э.Д.С., возникающая при ударном сжатии вещества // Успехи физ. наук. 1976. Т. 119, № 1. С. 75–109.
  17. **Бреусов О. Н., Дремин А. Н., Набатов С. С., Якушев В. В.** К вопросу об ударной поляризации воды // Журн. эксперим. и теор. физики. 1971. Т. 61, вып. 3(9). С. 1106–1111.
  18. **Набатов С. С., Дремин А. Н., Постнов В. И., Якушев В. В.** Измерение электропроводности конденсированных веществ при квазиизэнтропическом сжатии до одного мегабара // Сборник тез. докл. III Всесоюз. симпозиум по импульсным давлениям. М.: ВНИИФТРИ, 1979. С. 86–87.
  19. **Mitchell A. C., Nellis W. J.** Equation of state and electrical conductivity of water and ammonia shocked to the 100 GPa (1 Mbar) pressure range // J. Chem. Phys. 1982. V. 76, N 12. P. 6273–6281.
  20. **Кормер С. Б., Сеницын М. В., Кириллов Г. А., Попова Л. Т.** Экспериментальное определение коэффициента поглощения света ударно-сжатым NaCl. Механизм поглощения и проводимости // Журн. эксперим. и теор. физики. 1965. Т. 49, вып. 1(7). С. 135–147.
  21. **Lyzenga G. A.** Optical pyrometry at shock pressures and its interpretation // Shock Waves in Condensed Matter-1981 / W. J. Nellis, L. Seaman, R. A. Graham (Eds). New York: Amer. Inst. of Physics, 1982. P. 268–276.
  22. **Schmidt D., Svendsen B., and Ahrens T. J.** Shock induced radiation from minerals // Shock Waves in Condensed Matter-1985 / Y. M. Gupta (Ed.). New York and London: Plenum Press, 1986. P. 261–265.
  23. **Лёвшин Л. В., Салецкий А. М.** Люминесценция и ее измерения. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989.
  24. **Зельдович Я. Б., Кормер С. Б., Урлин В. Д.** Неравновесное излучение ударно-сжатых ионных кристаллов при  $T > 1$  эВ. II // Журн. эксперим. и теор. физики. 1968. Т. 55, вып. 5(11). С. 1631–1639.
  25. **Калашников Я. А.** Физическая химия при высоких давлениях. М.: Высш. шк., 1987.
  26. **Зельдович Я. Б.** К теории образования новой фазы. Кавитация // Избранные труды «Химическая физика и гидродинамика». М.: Наука, 1984.
  27. **Гогоуля М. Ф., Бражников М. А., Долгобородов А. Ю., Душенков С. А.** Исследование инициирования жидких взрывчатых веществ методом оптической пирометрии // Хим. физика. 1998. Т. 17, № 12. С. 62–68.

28. **Leal Crouzet Blandine.** Application de la pyrometrie optique a la mesure de la temperature des produits de reaction d'explosifs condenses en regime d'armorage et de detonation: These pour l'obtention du Grade de Docteur De l' Universite De Poitiers. 1998.
29. **Leal B., Baudin G., Gouteelle J. C., Presles H. N.** An Optical Pyrometer for Time Resolved Temperature Measurements in Detonation Wave // Proc. 11th Intern. Detonation Symp. Snowmass Village, Colorado, August 30 — September 4, 1998. P. 353–361.
30. **Ahrens T. J. and Ruderman M. H.** Immersed-foil method for measuring shock waves profiles in solids // J. Appl. Phys. 1966. V. 37, N 13. P. 4758–4765.
31. **Юшко К. Б., Кришкевич Г. В., Кормер С. Б.** Изменение показателя преломления жидкостей при сжатии ударной волной. Аномальные оптические свойства четыреххлористого углерода // Письма в ЖЭТФ. 1968. Т. 7, № 1. С. 12–16.
32. **Petersen C. F. and Rosenberg J. T.** Index of refraction of ethanol and glycerol under shock // J. Appl. Phys. 1969. V. 40, N 7. P. 3044–3046.

*Поступила в редакцию 10/X 2002 г.*