

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ ВЗРЫВНОГО ТИПА ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ФОТОМЕТРИИ

Е. Г. Попов, М. А. Цикулин

(Москва)

Предлагается использовать стабильную по амплитуде сильную ударную волну в газе как высокотемпературный эталон излучения черного тела. Для получения таких волн применен заряд взрывчатого вещества с кумулятивным каналом. В широкой области спектра, захватывающей кварцевый ультрафиолет, видимый и инфракрасный участки, исследуется излучение подобного источника.

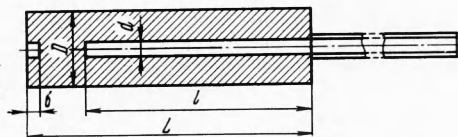
В технике фотометрии распространены источники света с телом накаливания в качестве излучателя. Примером служит измерительная лампа с лентой из вольфрама или равномерно нагретая полость с отверстием, имитирующая черное тело. Температура таких излучателей обычно не превышает 3000°K , тогда как при исследовании некоторых явлений сталкиваются с яркостными температурами $\sim 10^4$ — 10^5°K и выше. Большое различие яркостей исследуемого объекта и эталона сравнения зачастую сильно затрудняет калибровку приемников излучения. Для этого удобен высокотемпературный эталон. Потребность в таком эталоне возникает при измерениях в ультрафиолетовой области, где из-за малой яркости тела накаливания практически не пригодны. Неплохие результаты дали попытки приспособить для этих целей электрический разряд в газах. Так, созданный недавно импульсный источник ЭВ-39 (ЭВ-45) излучает как черное тело с температурой $41\ 000^\circ\text{K}$ в участке $\lambda = 200$ — $600\ \text{нм}$ [1,2].

Эксперимент и теория показывают [3,5], что ударные волны в воздухе при атмосферном давлении и температурах за фронтом $10\ 000$ — $50\ 000^\circ\text{K}$ излучают как черное тело в весьма широком спектральном интервале, простирающемся в ультрафиолетовую и инфракрасную области. Вопрос об ударной волне как эталоне излучения черного тела при высоких температурах, пригодном для фотометрических исследований в широкой области спектра, уже ставился авторами (заявка на изобретение № 1277550). В данной работе этот вопрос подвергнут дальнейшему изучению.

Получение стабильных по амплитуде сильных ударных волн. Чтобы знать яркостную температуру ударной волны, используя ее как импульсный эталон излучения, достаточно измерять скорость фронта волны. Например, измеряя с помощью фоторегистратора СФР-2 скорость с точностью $\pm 1\%$ и прибегая к расчетным ударным адiabатам, можно определять температуру с точностью не хуже $\pm 3\%$. Однако на практике

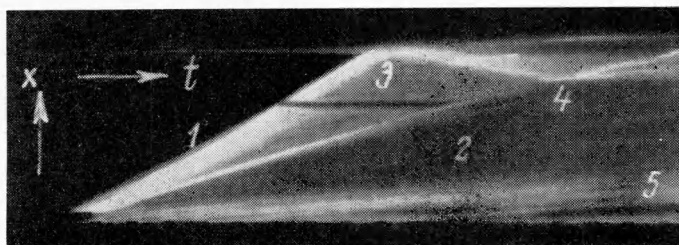
предпочитают иметь источник с известной заранее яркостной температурой, постоянно в течение некоторого отрезка времени. Чтобы удовлетворить этим требованиям, для получения сильных ударных волн применен заряд взрывчатого вещества с кумулятивным каналом (фиг. 1). Заряд отливается из ТГ 40/60 (40% тротила, 60% гексогена).

Эксперименты показали, что после инициирования заряда и выхода детонации на дно канала продукты взрыва схлопываются и образуют в канале опережающую детонационный фронт струю. Скорость струи растет, соответственно растет скорость ударной волны в канале. Пройдя путь $\sim 8d$, ударная волна набирает максимальную скорость, которую сохраняет при дальнейшем движении. На фиг. 2 представлена фотохронограмма ударной волны и струи в стеклянной трубке, служащей продолжением канала (в эксперименте ис-



Фиг. 1. Заряд с кумулятивным каналом и приставной трубкой

схлопываются и образуют в канале опережающую детонационный фронт струю. Скорость струи растет, соответственно растет скорость ударной волны в канале. Пройдя путь $\sim 8d$, ударная волна набирает максимальную скорость, которую сохраняет при дальнейшем движении. На фиг. 2 представлена фотохронограмма ударной волны и струи в стеклянной трубке, служащей продолжением канала (в эксперименте ис-



Фиг. 2. Фотохронограмма ударной волны и струи в трубке (щель фоторегистратора параллельна оси трубки): 1 — ударная волна, 2 — струя, 3 — отражение ударной волны от закрытого конца трубки, 4 — отражение от струи, 5 — ударная волна вне трубки от разлетающихся продуктов взрыва

пользовался укороченный заряд с $l = 5d$, что дало возможность наблюдать в трубке разгон струи и ударной волны до максимальной скорости). Возбуждение ударной волны при выходе детонации на дно канала, последующее схлопывание продуктов взрыва и образование стабильной по амплитуде сильной ударной волны прослеживаются на фотохронограмме, приведенной на фиг. 3.

Можно ожидать, что при детонации достаточно протяженного заряда удлинение струи и столба ударно нагретого газа приведет к их интенсивному торможению в канале. Контакт с продуктами струи и ударно нагретым газом может вызвать разложение или детонацию ВВ. В некоторых экспериментах длина канала достигала $30d$, однако стабильность амплитуды ударной волны сохранялась. По-видимому, при $l \lesssim 30d$ трение и взаимодействие с ВВ в канале на движение ударной волны существенно не влияют. Согласно [6], эти эффекты проявляются при $l \gtrsim 100d$.

Значение скорости стабильной

ударной волны зависит от отноше-

ния диаметров канала и заряда.

С увеличением отношения скорости

растет, хотя при $D/d \geq 4$ этот рост

сильно замедляется. В эксперимен-

тах с зарядами, диаметр канала ко-

торых менялся от 3 до 18 мм, про-

верялось геометрическое подобие

движения ударной волны в канале.

Оказалось, что подобие и стабиль-

ность ударной волны нарушаются

при тонких стенках канала, когда $(D - d) \lesssim 10$ мм. Скорость ударной волны при

этом снижается. Отмеченные моменты можно объяснить близостью толщины стенки

к критическому диаметру детонации ВВ. Об этом же свидетельствуют эксперименты с

зарядами из литого тротила, для которых отклонение от подобия проявлялось силь-

нее. Исходя из приведенных выше результатов, для исследования изучения стабиль-

ной ударной волны взят заряд со следующими размерами: $d = 8$ мм, $D = 30$ мм,

$l = 120$ мм, $L = 150$ мм, углубление под детонатор $\delta = 10$ мм; вес заряда 168 г.

Тщательные измерения скорости стабильной ударной волны в воздухе, образующейся

при детонации такого заряда, дают 13.6 ± 0.1 км/сек. Если воспользоваться ударной

адиабатой воздуха из [7], то измеренному значению скорости соответствует температура

газа за фронтом $24\,000 \pm 700^\circ$ К.

При выбранных размерах заряда неточности их соблюдения мало влияют на ско-

рость стабильной ударной волны, так как при $l > 8d$ в канале устанавливается макси-

мальная скорость, значение которой при $D/d \geq 4$ слабо зависит от диаметров d и

D . Из этих же соображений, а также для повышения температуры ударной волны оправ-

дан выбор возможно большего отношения D/d , если увеличение веса заряда не играет

роли. Так, для зарядов с $D = 60$ мм ($D/d = 7.5$) измерены скорость 16.7 км/сек и

температура $32\,000^\circ$ К, однако вес зарядов увеличился в 4 раза.

Об измерении яркостной температуры.

Яркостная температура определялась из

фотометрического сравнения плотностей почернения, полученных на фотоленке при

целевой развертке ударной волны и эталона яркости на приборе СФР-2. Ультрафио-

летовый ($\lambda_{eff} = 330$ нм), синий ($\lambda_{eff} = 432$ нм) и желтый ($\lambda_{eff} = 560$ нм) участки спектра

выделялись светофильтрами, эффективная длина волны пропускания которых λ_{eff}

находилась с учетом фотоактиничной поправки. Эталон яркости служил импульсный

источник ЭВ-39 [2].

Измерения яркостной температуры в отдельных участках спектра дополнены

спектральным исследованием излучения. Разрешенные во времени спектры ультра-

фиолетового и видимого излучения ($\lambda = 220 - 700$ нм) ударной волны регистрировались

светосильным спектрофотохронографом СП-111. В видимой области использовался так-

же фотохронограф СФР-2 со спектральными приставками СП-77, СП-78. Путем фото-

метрического сравнения плотностей почернения спектрофотохронограмм ударной вол-

ны и источника ЭВ-39 на участке $\lambda = 220 - 600$ нм измерялась спектральная яркост-

ная температура. Марки почернения, необходимые для построения характеристической

кривой фотослоя, впечатывались при съемке источника ЭВ-39 (с этой целью на фокаль-

ных дугах приборов СФР-2 и СП-111 помещались ступенчатые ослабители [4,5]). Спек-

тральное разрешение при использовании прибора СП-111 со сменной решеткой 1200

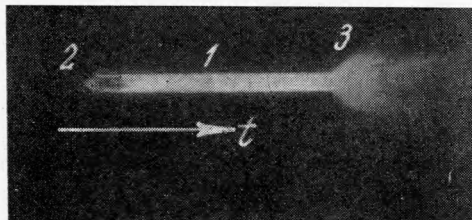
штрих./мм составляло 0.7 Å. В попытках обнаружить узкие линии в спектре излучения

ударной волны применялись спектрографы Q-12 и СТЭ-1, обеспечившие разреше-

ние 0.1 Å.

Инфракрасное и видимое излучение исследовалось с помощью фотоэлектрических

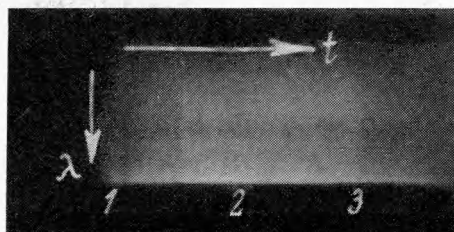
приемников. В желтом ($\lambda_{eff} = 560$ нм), красном ($\lambda_{eff} = 660$ нм) и ближнем инфракрас-



Фиг. 3. Фотохронограмма яркости ударной волны в канале (цель фоторегистратора перпендикулярна оси трубки): 1 — стабильная ударная волна, 2 — выход детонации на дно канала, 3 — разлет ударно нагретого газа из трубки

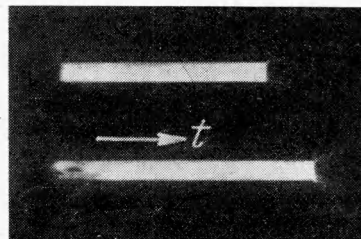
ном ($\lambda_{eff} = 778 \text{ нм}$) участках спектра, выделяемых светофильтрами, излучение регистрировалось фотоумножителем ФЭУ-22. Инфракрасное излучение в участке $\lambda_{eff} = 1300 \text{ нм}$ регистрировалось германиевоиндиевым фотодиодом ФД-ГИ. Сигналы от ФЭУ-22 и ФД-ГИ подавались на осциллографы ОК-33 и ОК-17М.

Эталоном яркости при фотоэлектрических измерениях служила лампа СИ10-300. Яркостная температура вольфрамовой ленты в участке $\lambda_{eff} = 660 \text{ нм}$ измерялась с помощью прецизионного оптического пирометра ЭОП-51 и равна в экспериментах $2800 \pm 10^\circ \text{ К}$. По результатам этих измерений и табличным значениям спектральной черноты накаливаемого вольфрама определялась яркостная температура ленты в остальных участках спектра.



Фиг. 4

Фиг. 4. Спектрофотохронограмма яркости ударной волны в канале ($\lambda = 390-700 \text{ нм}$, получена на приборе СФР-2 с приставкой СП-77): 1 — выход детонации на дно канала, 2 — стабильная ударная волна, 3 — разлет ударно нагретого газа из трубки; широкие полосы в спектре обусловлены спектральной чувствительностью фотослоя



Фиг. 5

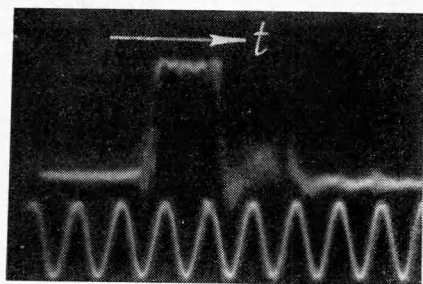
Фиг. 5. Фотохронограммы яркости ударных волн, дающих импульс излучения прямоугольной формы

В экспериментах объектив проектировал ленту лампы или ударную волну на экран так, чтобы их изображение полностью заполняло отверстие в экране. За экраном последовательно располагались матовое стекло, светофильтр и фотоэлектрический приемник излучения. Большое различие яркостей ударной волны и ленты лампы компенсировалось установкой на объектив диафрагм; при этом электронная аппаратура фиксировала лишь совпадение амплитуд сигналов, а яркостная температура определялась по результатам измерений диаметра диафрагм на компараторе. Световой сигнал ленточной лампы модулировался вращающимся диском с отверстиями и фотографировался с экрана осциллографа.

Применявшиеся фотографическая и фотоэлектрическая методики обеспечивали временное разрешение 10^{-7} сек .

Анализ результатов. О виде импульса излучения по детонации заряда с кумулятивным каналом можно судить по фиг. 3, 4. Время свечения стабильной ударной волны в канале заряда 5 мксек . Если к заряду прикреплялась трубка из картона или другого плотного материала длиной не более 160 мм , то ударная волна распространялась по ней без заметного затухания и время свечения продлевалось до 17 мксек .

Иногда удобно иметь прямоугольный калибровочный импульс. Время образования стабильной ударной волны сокращается с 5 до 2 мксек , если воспользоваться удлин-



Фиг. 6. Осциллограмма яркости ударной волны в инфракрасном участке $\lambda_{eff} = 1300 \text{ нм}$ с отсечкой фронтов импульса излучения (частота меток 10 мксек)

ненным ($L = 180 \text{ мм}$) зарядом, дно канала которого не плоское, как на фиг. 1, а в виде конической выемки (фиг. 5, нижняя развертка). Можно сократить передний фронт импульса излучения до 0.1 мксек , закрыв ту часть канала, где устанавливается стабильная ударная волна, непрозрачной пленкой (например, копировальной бумагой). Последняя разрушается ударной волной, не внося заметных возмущений (верхняя развертка на фиг. 5, осциллограмма на фиг. 6). Задний фронт импульса отсекается за $\sim 1 \text{ мксек}$ при растрескивании ударной волной окна из кварца или стекла, укрепленного на конце приставной трубки (фиг. 5, 6)¹.

¹ Отсечка фронтов импульса применялась при исследовании излучения стабильной ударной волны с помощью спектрографов Q-12 и СТЭ-1.

Спектр излучения ударной волны сплошной. Даже на спектрофотограммах с разрешением 0.1 \AA линии отсутствовали. Оценки ширины линий в условиях экспериментов дают $\sim 100 \div 1 \text{ \AA}$. Наименьшая ширина заведомо ограничивается доплеровским уширением $\sim 0.1 \text{ \AA}$. Поэтому отсутствие линий обусловлено характером излучения ударной волны, а не возможностями методики. Такой характер спектра сближает ударную волну с телами накаливания.

Измерены следующие значения яркостной температуры стабильной ударной волны в различных участках спектра:

λ , нм	230	330	432	560	600	660	778	1300	
$T \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{K}$	24.5	23.5	23.5	24.6	25.2	—	—	—	(из спектрофотохронограмм)
$T \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{K}$	—	23.0	23.0	24.0	—	—	—	—	(из фотохронограмм)
$T \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{K}$	—	—	—	23.0	—	22.6	23.0	25.1	(фотоэлектрические измерения)

Пульсации температуры во времени и по сечению канала не превышали $\pm 1000^\circ \text{K}$. В этих же пределах заключен разброс температуры от опыта к опыту. Для зарядов, изготовленных из ТГ 50/50, яркостная температура ниже на 1000°K . Избегая неоднородностей при отливке заряда, иницируя заряд строго по оси, удавалось снизить пульсации до $\pm 400^\circ \text{K}$. Постоянство яркостной температуры при движении ударной волны, когда растет геометрическая толщина нагретого газа, — свидетельство его большой оптической толщины.

Заменяв воздух на другой газ, можно повысить температуру, продвинувшись в область вакуумного ультрафиолета. Если наполнить канал неоном, то температура возрастет до $32\,000^\circ \text{K}$. В аргоне температура ударной волны в синем свете составляла $40\,000^\circ \text{K}$, хотя в нем и более тяжелых инертных газах нестационарная экранировка и неустойчивость плоского ударного фронта [4] осложняют получение стабильных импульсов излучения.

Полученные экспериментальные результаты, дополняя предшествовавшие исследования [4,5], подтверждают выводы теории о том, что ударные волны в определенном диапазоне амплитуд излучают как абсолютно черное тело. Ударные волны, образующиеся при детонации заряда с кумулятивным каналом, оказались источником сравнительно стабильных импульсов излучения. Описанный здесь источник применялся авторами в качестве эталона яркости при исследовании излучательных свойств ударных волн в инертных газах [8]. Малые вес и габариты, независимость от электрической сети, простота изготовления позволяют успешно применять источник не только в лабораторных (бронекмеры), но и в полевых (полигоны) условиях.

Авторы благодарны Ю. А. Зацепину и С. В. Кондратьеву за помощь в экспериментах.

Поступила 29 XII 1969

ЛИТЕРАТУРА

- Огурцова Н. Н., Подмошенский Н. В., Демидов М. И. Импульсный источник света с излучением, подобным излучению абсолютно черного тела при температуре $\sim 40\,000^\circ \text{K}$. Опико-механ. пром-сть, 1960, № 1.
- Демидов М. И., Огурцова Н. Н., Подмошенский И. В., Шеленина В. М. Энергетическая калибровка излучения импульсного источника света ЭВ-45 (ЭВ-39) в ультрафиолетовой области спектра. Ж. прикл. спектроскопии, 1968, т. 10, №3.
- Зельдович Я. В., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., «Наука», 1966.
- Зацепин Ю. А., Попов Е. Г., Цикулин М. А. Яркость фронта ударных волн в некоторых газах. ЖЭТФ, 1968, т. 54, вып. 1.
- Попов Е. Г., Цикулин М. А. Спектральная яркость ударных волн в воздухе. ЖЭТФ, 1969, т. 56, вып. 2.
- Загуменнов А. С., Титов Н. С., Фадеев Ю. И., Чистяков В. П. Детонация удлиненных зарядов с полостями. ПМТФ, 1969, № 2.
- Кузнецов Н. М. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах. М., «Машиностроение» 1965.
- Попов Е. Г., Цикулин М. А. Спектральное распределение излучения ударных волн в инертных газах. ЖЭТФ, 1969, т. 57, вып. 2.