

А.А. Коньков, Ю.А. Поляков, С.В. Пузач
(Академия ГПС МЧС России; e-mail: info@academygps.ru)

ДИАГНОСТИКА ИЗЛУЧЕНИЯ ЗА ОТРАЖЁННОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ В ДВУХФАЗНОЙ СРЕДЕ

Представлены результаты экспериментального исследования влияния мелкодисперсных частиц на излучение газа за отражённой ударной волной. Показано, что лучистый тепловой поток почти на порядок возрастает при наличии мелкодисперсных частиц в воздухе.

Ключевые слова: излучение, ударная волна, термосенсор с тонким поглощающим покрытием.

A.A. Konykov, Yu.A. Polyakov, S.V. Puzach **DIAGNOSTICS OF RADIATION BEHIND REFLECTION THE SHOCK WAVE IN TWO-PHASE MEDIUM**

The results of the experimental investigation of influence small-dispersion particles on radiation of gas behind reflection the shock wave are observed. It is shown that radiation heat flow almost order increasing of the presence small-dispersion particles in air.

Key words: radiation, shock wave, termosensor with thin absorption coating.

Газопылевые смеси при высоких температурах участвуют в процессах плазмохимии, присутствуют в пограничном слое аблирующих материалов тепловой защиты сверхзвуковых аппаратов, входящих в плотные слои атмосферы, образуются при распространении сильных ударных волн при взрывах в каналах и вдоль земной поверхности.

При этом важно оценить влияние мелкодисперсной твёрдой фазы на интенсивность излучения газа [1].

Применение термосенсора с поглощающим покрытием в качестве измерительного зонда при диагностике импульсного теплообмена позволило получить уникальную информацию о роли мелких частиц при излучении двухфазной среды. Исследование теплообмена излучением за отражённой ударной волной проводилось в ударной трубе, позволяющей генерировать сильные ударные волны в газопылевой среде от 2 до 7 км/с.

При отражении нормально падающей ударной волны от плоской стенки возникает ситуация, при которой у стенки кратковременно пребывает высокотемпературный объём газа. За отражённой волной скачкообразно меняются температура и давление, наблюдается динамический и тепловой удары. Быстропротекающие процессы в ударных волнах невозможно изучать без применения скоростных методов измерений термогазодинамических параметров.

Применение фотографических методов диагностики состояния заторможенного газа при отражении волны от плоской стенки позволило получить ценную информацию о протекании во времени термогазодинамических процессов в этих условиях [2].

Кратковременностью процесса в ударных трубах определяются требования, предъявляемые к методике скоростного фотографирования тепловых картин газодинамических состояний при отражении. При визуализации возмущений в потоке используются приборы ИАБ-451 и *скоростной фоторегистратор (СФР)* в варианте лупы времени. На рис. 1. изображена оптическая схема метода.

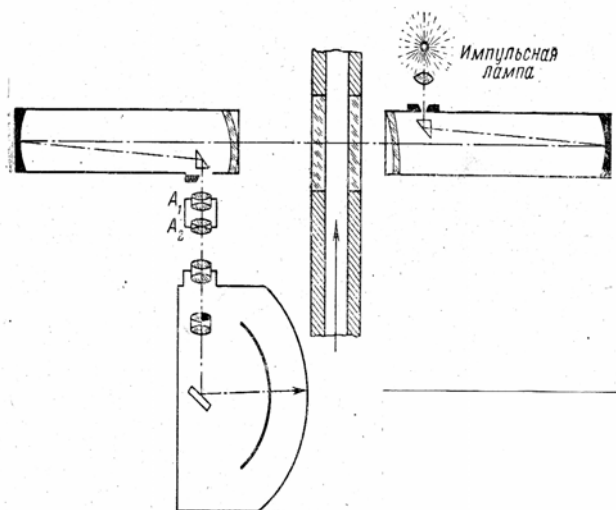


Рис. 1. Оптическая схема скоростной регистрации газодинамических потоков в ударной трубе:
 A_1 и A_2 – объективы, согласующие прибор ИАБ-451 с камерой СФ

Ударная труба имеет секцию квадратного сечения (60×60 мм) с боковыми окнами из оптического стекла К-3.

Эта секция, расположенная в поле зрения прибора ИАБ-451, является рабочим участком ударной трубы. Источником света служит импульсная лампа ИФП-1500, находящаяся на двойном фокусном расстоянии от конденсатора, проектирующего часть светящегося столба лампы на щель прибора ИАБ-451.

Лампа связана с конденсатором, заряженным до напряжения 5 кВ. При подходе ударной волны к рабочей секции лампа зажигается с помощью электронной схемы.

Световой пучок, прошедший сквозь область возмущений в потоке газа, фокусируется вторым зеркально-менисковым объективом прибора ИАБ-451 в плоскости ножа.

Ниже (рис. 2) представлена часть серии снимков, полученной при отражении ударной волны от плоской стенки. Интервал между кадрами – 8 мкс; выдержка – 0,7 мкс. Начальное давление в секции $p_1 = 1,3$ мм рт. ст. Число Маха ударной волны $M_S = 10,2$. Толкающим газом был водород.

На кадре 1 белая полоса изображает волну, движущуюся слева направо. Правый край кадра – отражающая стенка. Стрелка под кадром 5 показывает движение фронта отражённой волны.

Начиная с кадра 4 и далее видно, что процесс отражения ударной волны сопровождается бифуркацией, то есть взаимодействием её с пограничным слоем, что приводит к сложной конфигурации возмущений (λ -ножки).

Перед отражённой ударной волной наблюдается искажение фронта вблизи соприкосновения переднего скачка уплотнения λ -ножек с пограничным слоем. Эти зоны градиентов плотности расположены по периметру ударной трубы и находятся не в объёме газа, а на границе пограничного слоя. Плёночный термосенсор монтировался в средней части торца, поэтому на его показания пристеночные бифуркации не оказывали влияние.

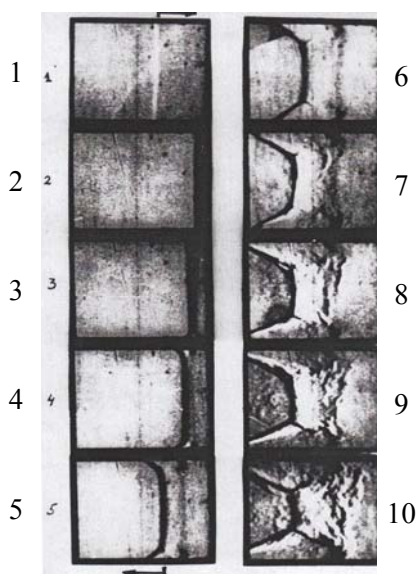


Рис. 2. Покадровая съёмка процесса отражения ударной волны от торца

Метод развёртки позволил установить взаимодействие отражённой волны с пограничным слоем (рис. 3).

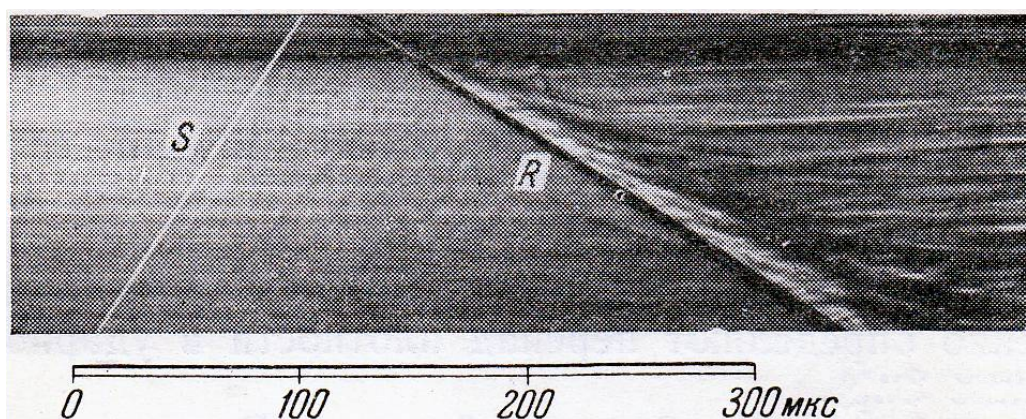


Рис. 3. Развёртка движения падающей (S) и отражённой (R) ударных волн. След R -волны связан с взаимодействием её с пограничным слоем

Установка для получения ударных волн в двухфазной газопылевой среде имела **камеру высокого давления (КВД)** длиной 1,3 м, которая отделялась от **камеры низкого давления (КНД)** (длина 4 м) медной диафрагмой с крестообразной насечкой. Внутренний диаметр канала равнялся 30 мм.

В качестве инициирования рабочего процесса в камеру высокого давления вводилась **кислород-водород-гелиевая смесь (КВГС)**; зажигание осуществлялось при $p_1 = 20-50 \text{ атм}$ (рис. 4).

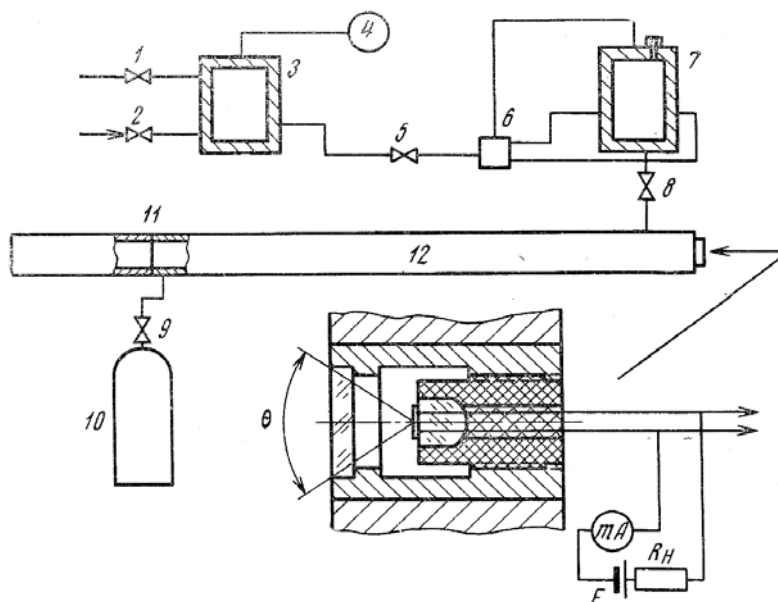


Рис. 4. Экспериментальная ударно-импульсная установка с термосенсором, смонтированным в торце канала:

- 1, 2, 5, 8, 9 – вентили; 3 – цилиндр дозирования рабочего давления;
- 4 – манометр; 6 – тройник; 7 – смеситель; 10 – балластная ёмкость;
- 11 – диафрагма; 12 – камера низкого давления

Скорость волны измерялась ионизационными датчиками. Сигналы двух датчиков, имевших крутые фронты, использовались для запуска и остановки измерителя времени типа ИВ-13М.

Таким способом определялось время прохождения ударной волной расстояния между двумя датчиками. Погрешность измерения скорости не превышала 3 %.

В качестве фильтра применялся кристалл сапфира, толщина которого составляла 1 мм. Полоса пропускания фильтра находилась в пределах $0,17 \leq \lambda \leq 6,5 \text{ мкм}$. Угол зрения термосенсора составлял 35 градусов.

Для создания двухфазной среды с помощью системы ввода в камеру низкого давления из цилиндра дозирования 3 подавалась навеска порошка Al_2O_3 .

Быстродействующие сильфонные вентили (1, 2, 5, 6, 9) обеспечивали стабильную повторяемость газопылевого фона в камере низкого давления. Размеры частиц Al_2O_3 , определяемые по микрофотографиям, находились в пределах от 1 до 5 мкм. Весовое соотношение твёрдой и газовой фаз в пылевоздушной смеси определялось из следующих соображений.

В соответствии с законом Стокса скорость свободного падения шарика диаметром d в вязком газе вычисляется по формуле

$$V = \frac{1}{18} \frac{d^2}{\mu} (\rho_s - \rho_g) \left(1 + 2 \frac{\ell}{d}\right),$$

где μ – вязкость газа;

ρ_s – плотность материала частиц;

ρ_g – плотность газа;

ℓ – средняя длина свободного пробега молекул.

Из кинетической теории газов известно, что

$$\ell = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi \sigma^2 p},$$

где σ – диаметр молекулы;

p – давление газа.

Расчёт скорости оседания частиц до 5 мкм при давлении 1-4 атм показывает, что практически все частицы, засыпанные в цилиндр-смеситель 7, при открытии вентиля 8, вместе с расширяющимся воздухом, переносились в камеру трубы и в балластную ёмкость 10.

Хронометраж выполнявшихся операций показал, что в момент прохождения ударной волны остаются взвешенными в воздухе только частицы с размерами порядка 1 мкм и менее.

При этих оценках рассматривались только сферические частицы. Отличие их формы от сферической приведёт к увеличению времени падения.

Статистическая обработка микрофотоснимков порошка окиси алюминия показала, что в составе порошка, использованного в опытах, вес частиц размером 1 мкм и менее, составляет 0,08 общего веса пробы. С учётом этого соотношения в цилиндр-смеситель 7 засыпалось такое количество порошка, чтобы при давлении 5 мм рт. ст. масса взвешенных частиц составляла 0,2 общей массы газа и частиц.

При скорости ударной волны 6 км/с протяжённость области высокотемпературного газа за отражённой ударной волной составляла 4,5 см (если не учитывать влияния взвешенной твёрдой фазы и пограничного слоя за падающей волной).

Температура и давление воздуха за отражённой ударной волной, вычисленные по скорости падающей волны, составляли 9700 К и 38 атм соответственно при $V_s = 6$ км/с и 4400 К и 8 атм при $V_s = 3$ км/с.

Повышение температуры смеси при отражении ускоряет диссоциацию и ионизацию молекул взвеси.

Изучение динамики излучения после отражения ударной волны от плоской стенки было проведено с помощью термосенсора с тонким поглощающим покрытием из висмутовой "черни" [3].

Технология предусматривала нанесение *чувствительного элемента (ЧЭ)* из платины методом "вжигания" из вязкой пасты на основе H_2PtCl_6 оптимальной рецептуры.

Между платиновыми выводами, вваренными в стеклянную матрицу, наносилась полоска пасты, которая сушилась в течение 30 минут, а затем отжигалась в печи при температуре $500\text{ }^\circ\text{C}$ в течение ~ 10 минут.

ЧЭ покрывался висмутовой "чернью", получаемой методом вакуумного распыления металлического висмута в атмосфере аргона при давлении $0,2\text{ мм рт. ст.}$ Висмут испарялся при температуре $570\text{ }^\circ\text{C}$ в вольфрамовом испарителе.

Толщины покрытий измерялись на интерференционном микроскопе МИИ-10 и контролировались временем напыления.

Поглощательная способность "черни" изучалась в области длин волн от $0,2$ до 5 мкм . Коэффициент поглощения определялся по формуле:

$$\varepsilon = (1 - \gamma^2 \rho' - \rho) / (1 + \gamma \rho'),$$

в которой не учитывались величины второго порядка малости $0(\rho), 0(\rho')$.

Так как зеркальное отражение "черни" практически равно нулю, а диффузное – составляет величину не более $1,5\%$, значение коэффициента отражения "черни" ρ не оказывает заметного влияния на результат.

Коэффициент отражения платиновой плёнки ρ' определялся по табличным данным [4] в зависимости от длины волны падающего излучения.

Коэффициент пропускания "черни" γ измерялся в интервале длин волн от $0,2$ до 1 мкм спектрофотометром СФ-4, а в интервале длин волн от 1 до 5 мкм – спектрографом ИКС-14 с точностью до 1% . Результаты измерений поглощательной способности представлены на рис. 5.

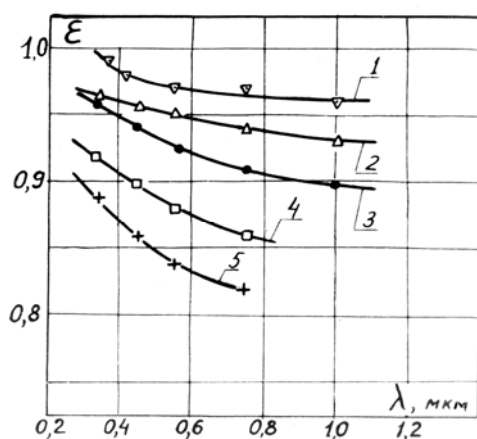


Рис. 5. Зависимость поглощательной способности покрытия от длины волны для различных толщин (l , в мкм):
 1 – $0,12$; 2 – $0,103$; 3 – $0,073$; 4 – $0,046$; 5 – $0,018$
 (висмутовая "чернь", получена методом вакуумного распыления в атмосфере аргона)

Анализ кривых показывает, что наиболее удовлетворительной, с точки зрения поглощения в области длин волн от 0,2 до 2 мкм, является толщина "черни" ~ 0,1-0,12 мкм.

Уменьшение толщины покрытия приводит к снижению поглощательных свойств покрытия.

Учитывая, что максимум излучения при высоких температурах ($\geq 5000\text{ K}$) сдвигается в область коротких длин волн, поглощающее покрытие толщиной ~ (0,1-0,15 мкм) имеет коэффициент поглощения $\varepsilon > 0,95$ в области длин волн от 0,2 до 2 мкм. На спектральные характеристики покрытий существенно влияют температурные условия отжига.

Во избежание взаимодействия платины и висмутовой "черни" под действием УФ части спектра между ЧЭ и покрытием наносится прослойка из диоксида кремния толщиной ~ 30 нм.

Этот слой также выполняет роль защитного слоя во избежание фотоэффекта на ЧЭ из платины под действием излучения. Термосенсоры устанавливались за сапфировым окном толщиной 0,5 мм в торце измерительной секции.

Диафрагма между камерами разрушалась давлением от сгорания смеси КВГС, при этом обеспечивались высокие скорости падающей ударной волны.

Запуск ждущей развёртки осциллографа осуществлялся с помощью ионизационного датчика.

Первая серия опытов была проведена для чистого воздуха с целью опробования работоспособности быстродействующего термосенсора с покрытием и методики вычисления лучистого потока по термограмме.

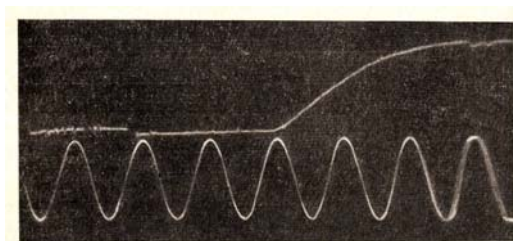


Рис. 6. Термограмма термосенсора после отражения ударной волны:
($V_S = 6,7\text{ км/с}$; метки времени – 10 мкс)

Если эту температурную зависимость от времени аппроксимировать степенной функцией $t = b\tau^{1/2^m}$, где $m = 0, 1, 2 \dots$, то плотность лучистого потока вычисляется по формуле:

$$q'_R(\tau) = \frac{\varepsilon_i b \tau^{1/2^{(m-1)}} \Gamma\left(\frac{1}{2}m + 1\right)}{\Gamma\left[1 + \frac{1}{2}(m-1)\right]},$$

где ε_i – коэффициент теплоусвоения подложки;
 τ – время от начала воздействия излучения на ЧЭ;
 $\Gamma(\dots)$ – Гамма-функция.

Окончательно лучистый поток с учётом пропускания фильтра, отражения "черни" и угла зрения термосенсора определяется как

$$q_R(\tau) = \frac{q'_R(\tau)}{\varepsilon \cdot \gamma \cdot \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)},$$

где γ – коэффициент пропускания фильтра;

ε – коэффициент поглощения "черни";

θ – эффективный пространственный угол зрения ЧЭ.

Опыты показали, что при принятых начальных параметрах время пребывания заторможенного газа у стенки составляет 30-35 мкс. При этом (расчёт) за отражённой волной температура равна ~ 8000 К, а давление $\sim 1,5$ атм.

На рис. 7 видна динамика интенсивности излучения воздуха при отсутствии взвешенных частиц.

Анализ термограмм излучения позволил сделать вывод: так как лучистый поток энергии до максимального значения меняется почти линейно, то интенсивность интегрального излучения пропорциональна толщине слоя, увеличивающегося при отражении.

Кроме того, практически линейный подъём q_R до 10-й микросекунды свидетельствует о быстром достижении состояния термодинамического равновесия в газе.

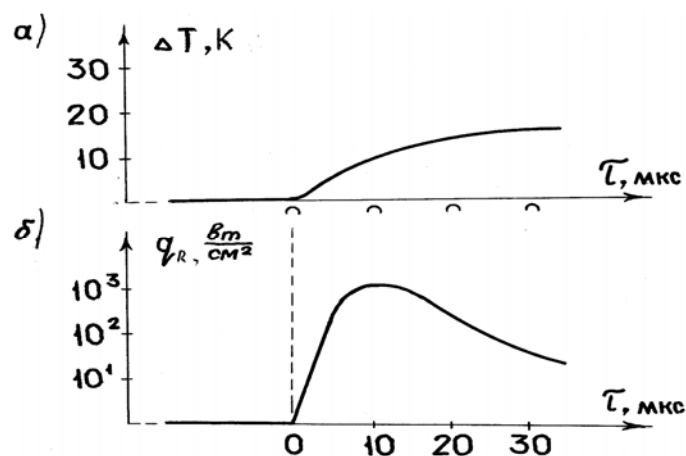


Рис. 7. Термограмма термосенсора при отражении волны (а) и зависимость плотности лучистого потока в торцевую стенку от времени (б):
($V_S = 6,7$ км/с)

Снижение лучистого потока после его максимального значения, видимо, связано с распадом газодинамической структуры вследствие прихода контактной зоны. Учитываем, что время достижения q_R^{\max} является функцией скорости отражённой волны и начального давления в трубе (рис. 8) [5].

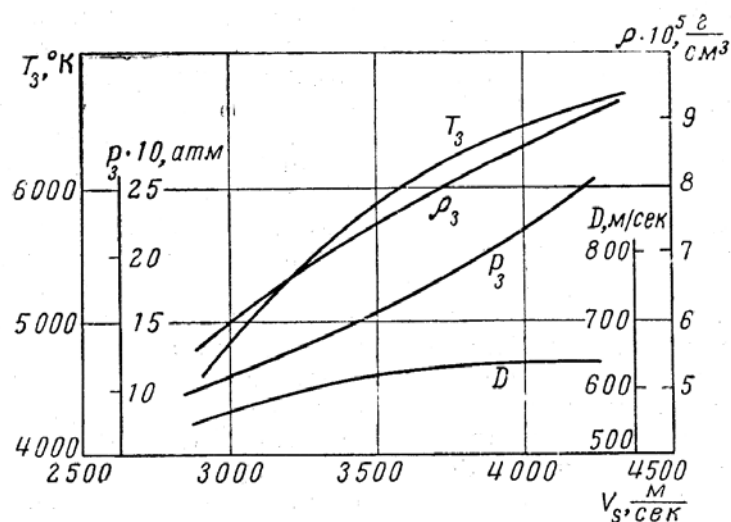


Рис. 8. Физические параметры воздуха за отражённой волной (равновесная диссоциация; давление в КНД – $p_1 = 10^{-3}$ атм)

На рис. 9 представлены результаты измерений лучистого потока в торцевую стенку после отражения от неё ударной волны при времени достижения его максимального значения.

Тестовые исследования, несмотря на существенный разброс опытных точек, показали, что разработанные термосенсоры способны идентифицировать лучистые потоки энергии с высоким временным разрешением.

При изучении теплообмена излучением в двухфазной среде были приняты меры по повышению точности фиксирования начального давления и скорости падающей ударной волны и способов расшифровки первичной информации.

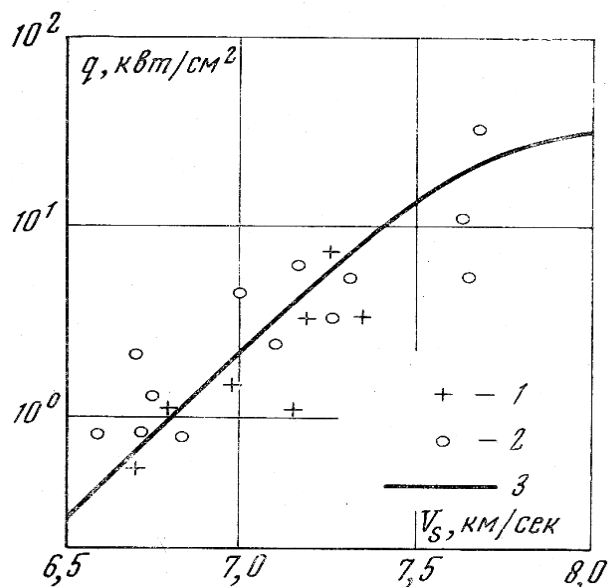


Рис. 9. Результаты измерений лучистого потока в торцевую стенку после отражения от неё ударной волны при времени достижения его максимального значения (чистый воздух; $p_1 = 1$ мм рт. ст.)
1 – результаты данной работы; 2 и 3 – опыты и расчёт работы [6]

Исследования проводились в ударной трубе Института высоких температур РАН, которая позволяла генерировать скорости волн от 2 до 7 км/с в газопылевой среде [7].

Вторая серия экспериментов проводилась при наличии за отраженной волной двухфазной среды, состоящей из воздуха и взвеси частиц окиси алюминия размером порядка 1 мкм.

Одновременно проведены измерения кондуктивных и лучистых тепловых потоков при отражении волны в двухфазной среде с помощью плёночного калориметра из титановой фольги. Результаты опытов подтвердили эффект увеличения лучистой составляющей в исследуемом диапазоне температур и давлений [8].

На рис. 10 приведены данные измерений лучистого теплового потока, испускаемого газопылевой смесью, которая находится за отражённой ударной волной.

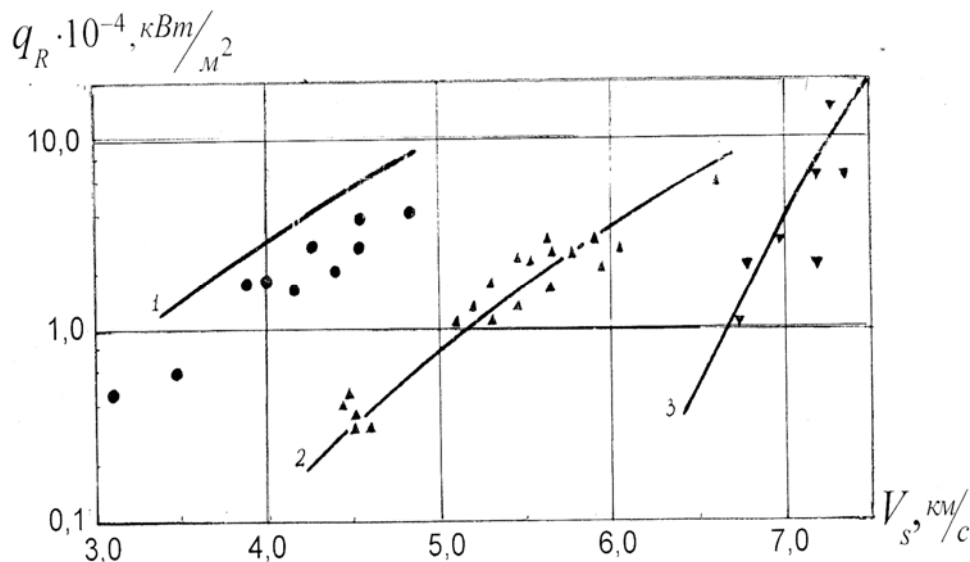


Рис. 10. Лучистый тепловой поток в функции скорости волны:
 ● – двухфазная среда (воздух и частицы Al_2O_3 : $p_1 = 5$ мм рт. ст.);
 ▲ – излучение чистого воздуха ($p_1 = 5$ мм рт. ст.);
 ▼ – излучение чистого воздуха ($p_1 = 1$ мм рт. ст.);
 1, 2, 3 – расчётные кривые

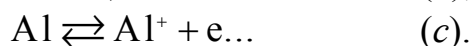
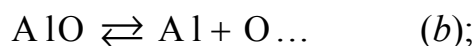
На рис. 10 теоретическая кривая 2 получена для чистого воздуха с помощью таблиц [9]. Различие результатов расчётов при использовании табличных данных о степени черноты воздуха, взятых из двух указанных источников, было несущественным по сравнению с разбросом опытных данных. Видно согласование теории с экспериментом.

Это же относится к расчётной кривой 3, взятой из работы [6].

Опытные данные, полученные нами для чистого воздуха при начальном давлении $p_1 = 1$ мм рт. ст. (рис. 9), так же согласуются с теоретической моделью.

Экспериментальные результаты измерений интегрального лучистого теплового потока в стенку, отражающую ударную волну, которая распространяется в двухфазной смеси воздух – твёрдые частицы Al_2O_3 показывают, что интенсивность излучения возросла на порядок величины по сравнению с излучением чистого воздуха.

Теоретическая модель расчёта для излучения двухфазной среды строилась по схеме диссоциации и ионизации:



Предполагалось, что параметры смеси отвечали состоянию воздуха за отражённой волной при V_S , измеренных в опытах с двухфазной средой.

Следует отметить что, появившиеся в результате ионизации электроны усиливают излучение среды.

В расчёте рассматривались два крайних случая: 1) $V_S = 4,6$ км/с при $p_1 = 5$ мм рт. ст. ($T_5 = 8000$ К, $p_5 = 20$ атм) и 2) $V_S = 3,5$ км/с при $p_1 = 5$ мм рт. ст. ($T_5 = 6000$ К, $p_5 = 10$ атм).

Реакция (a) считалась протекающей полностью в сторону распада молекул Al_2O_3 . Глубина диссоциации AlO по (b) вычислялась с использованием температурной зависимости константы равновесия этой реакции, которые принимались по справочнику термодинамических свойств веществ под редакцией Глушко В.П. 1962 г.

Было показано, что для случая (a) распались почти все, а для – (b) около 97 % молекул AlO . С помощью констант равновесия также вычислена степень ионизации атомов Al по реакции (c). Для (a) случая ионизировалось 15 % атомов алюминия, для (b) случая – 5 %.

Так как в основном все молекулы Al_2O_3 и AlO продиссоциировали, то излучение молекулярных полос в расчёте не учитывалось.

Непрерывное излучение, обусловленное свободно-свободными переходами электронов в полях нейтральных частиц, учитывалось с помощью соотношения Крамерса; непрерывное излучение, обусловленное торможением электронов в полях нейтральных частиц, учитывалось согласно результатам работы [10].

Вклад линий алюминия в лучистый поток не превышает нескольких процентов, поэтому не учитывался.

Теоретическая кривая 1 примерно вдвое превышает эксперимент. Это можно объяснить, во-первых, тем, что температура за отражённой волной в двухфазной среде ниже вычисленной по V_S вследствие процессов, происходящих с твёрдыми частицами, и, во-вторых, тем, что благодаря поглощению энергии частицами после отражения, скорость отражённой волны будет ниже, чем в чистом газе.

Последний факт приводит к уменьшению толщины излучающего слоя к моменту времени, принятому за расчётный. Оба фактора снижают величину лучистого теплового потока.

В результате можно сделать следующий вывод.

Получена ценная информация по влиянию продуктов термического разложения частиц окиси алюминия на величину лучистого теплового потока при отражении ударной волны от твёрдой преграды. Влияние излучения газообразных продуктов разрушения теплозащитного покрытия при снижении летательного объекта на всю картину теплообмена в окрестности критической точки может быть весьма существенным.

Этот результат должен учитываться при разработке тепловой защиты для спускаемых аппаратов при входе в плотные слои атмосферы.

Следует отметить, что поверочные эксперименты показали, что в первом приближении плотности лучистых тепловых потоков в диапазоне 3-12 % не зависят от весовой концентрации частиц окиси алюминия в исходной пылевоздушной среде.

Быстродействующая аппаратура способствовала получению уникальной информации. Лучистый тепловой поток почти на порядок возрастает при наличии взвеси при отражении ударной волны от преграды.

Это должно быть учтено в чрезвычайных ситуациях, в особенности при взаимодействии сильных ударных волн с преградой при их распространении вдоль земной поверхности.

Литература

1. *Пузач С.В., Прозоров Р.В.* К расчёту динамики опасных факторов пожара в помещении // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. Вып. 7. М.: ВИНТИ РАН, 1999. С. 122-127.
2. *Изучение* потоков газа в ударной трубе при помощи схемы Теплера и скоростного кадрового фотографирования / Ионов В.П., Николаев Г.Н., Гусев М.В., Лунёва О.И. // Сб. научных трудов "Физическая газодинамика: свойства газов при высоких температурах". М.: изд-во АН СССР, 1964.
3. *Поляков Ю.А., Котельникова Н.В.* Методика измерения лучистых тепловых потоков при импульсных процессах // Теплофизика высоких температур. 1971. № 4. С. 817-820.
4. *Рибо Г.* Оптическая пирометрия // Гостехиздат, 1934. 340 с.
5. *Поляков Ю.А., Баутин А.В.* К динамике излучающего газа // Труды 6-й Всесоюзной конференции по теплообмену. Т. 2. "Сложный теплообмен". Минск: ИТМО, 1980. С. 146-150.
6. *Golobic R, Nerem R.* AIAA (пер. Ракетная техника и космонавтика). 1968. Т. 6. № 9.
7. *Коньков А.А., Николаев Г.Н., Поляков Ю.А.* Теплообмен за отражённой ударной волной в двухфазном газодинамическом потоке // Известия АН СССР; Механика жидкости и газа. 1973. № 2. С. 127-137.
8. *Surzhikov S.T.* TC3: Convective and Radiative Heating of MSRO for Simplest Kinetic Models. Proc. Of the International Workshop on Radiation of High Temperature Gases in Atmospheric Entry. Part II. EAS SP-583. 2005. P. 55.
9. *Баженова Т.В., Предводителева О.А.* Значения параметров воздуха за прямым скачком уплотнения и за отражённой ударной волной при равновесной и замороженной диссоциации // Сб. научных трудов "Физическая газодинамика и теплообмен". М.: изд-во АН СССР, 1961. С. 15-24.
10. *Коньков А.А., Воронцов А.В.* Экспериментальное исследование ИК-излучения воздуха // Оптика и спектроскопия. 1971. № 6. С. 11-21.

Статья опубликована 25 декабря 2012 г.