

УДК 532.526

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА РАЗРУШАЮЩИХСЯ ОБРАЗЦАХ ПРИ СОВМЕСТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ КОНВЕКТИВНОГО И ЛУЧИСТОГО ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ

Э. Б. ГЕОРГ, Ю. К. РУЛЕВ, Г. Ф. СИПАЧЕВ, М. И. ЯКУШИН

(Москва)

Представлен спектр излучения паров пограничного слоя в диапазоне 3800—6600 Å образца из асбопластика, обтекаемого потоком воздушной плазмы безэлектродного высокочастотного разряда. Измерен профиль температуры в пограничном слое в окрестности критической точки. Предложена модель пограничного слоя на разрушающемся образце и оценена конвективная составляющая теплового потока к нему.

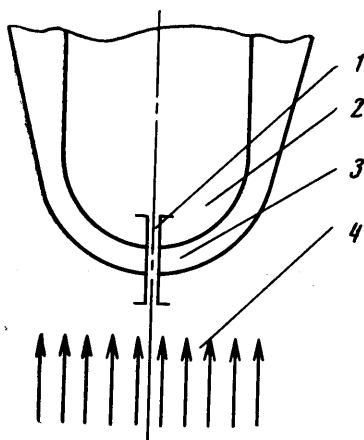
1. **Условия эксперимента.** Испытания проводились на установке, в которой для нагрева газа использовался высокочастотный безэлектродный разряд в потоке воздуха при атмосферном давлении. Такая установка обладает рядом преимуществ по сравнению с другими (использующими электродуговые подогреватели): полным отсутствием примесей, обусловленных разрушением электродов, наличием совместного действия конвективного и радиационного тепловых потоков, достаточно полным моделированием спектрального состава излучения от ударного слоя, хорошей пространственной температурной однородностью потока плазмы. Основные физические параметры плазменного потока для рабочего участка струи следующие: диаметр струи 37 мм, давление 1 кг/см², скорость 30 м/сек, энтальпия 10⁴ ккал/кг, суммарный тепловой поток к непроницаемой стенке 1150 ккал/м²·сек, конвективная составляющая $q_c^0 = 720$ ккал/м²·сек, поток вдуваемого газа $\rho_w u_w = 0.13$ кг/м²·сек, поток плазмы $\rho_e u_e = 0.6$ кг/м²·сек и число Рейнольдса $R = 100$. (Индексы e и w отмечают величины, относящиеся к внешней границе пограничного слоя и стенке соответственно. Градус сверху отмечает величины, полученные для пограничного слоя на неразрушающемся материале.) Результаты этих измерений подробно приведены в [1, 2].

Образцы из асбопластика имели форму цилиндра с диаметром 30 мм со сферической головной частью радиусом 15 мм и крепились в водоохлаждаемой державке, установленной на двухкомпонентном координатнике, при помощи которого образец вводился в рабочее сечение струи.

Оптическая система была настроена на измерение излучений плазмы, пограничного слоя и образца. Измерения проводились на призмном спектрографе ИСП-51 с камерой $f = 270$ мм (линейная дисперсия 11—342 Å/мм). Свет фокусировался на щель спектрографа конденсором $f = 300$ мм с масштабом изображения 1:1. На фиг. 1 показана проекция изображения щели спектрографа на пограничном слое. Исследуемый объект проектировался на входную щель спектрографа 1 таким образом, что можно было одновременно регистрировать излучение материала 2, пограничного слоя 3 и плазмы 4. Для калибровки полученных интенсивностей применялась эталонная вольфрамовая лампа СИ-8-200, дающая непрерывный спектр. Лампа устанавливалась в рабочее сечение струи, так что геометрия всей оптической системы оставалась такой же, как при измерении излучения паров и образца. Таким образом, спектрограф и оптическая система градуировались как единое целое.

Для съемок спектров использовались фотопластинки ORWO WO-3, WP-I. Фотометрирование спектрограмм излучения паров и непрерывного спектра от эталонной лампы производилось на регистрирующем микрофотометре ИФО-451.

Процесс взаимодействия воздушной струи с исследуемым материалом регистрировался киносъемочным аппаратом «Родина» со скоростью съемки кадр в секунду. Для получения качественных кинограмм пограничного слоя (см. фиг. 2) применялась фотоэмульсия ORWO J-750 и светофильтр КС-14.



Фиг. 1

радикала CN, непрерывное излучение, линейчатое излучение атомов Al, Ca, Si, Mn, Fe, Na.

В изученном спектральном интервале интенсивность излучения пограничного слоя сравнима, а в некоторых диапазонах даже превышает интенсивность излучения воздушной плазмы. Наблюдаются спектральные участки, сравнительно свободные от излучения пограничного слоя и воздушной плазмы, в которых можно измерять оптические характеристики поверхности излучающего материала.

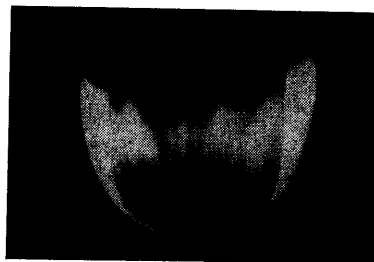
Отметим, что на спектрограмме обнаруживаются молекулярные системы полос диана с особенно интенсивной фиолетовой системой (переход $B^2\Sigma \rightarrow X^2\Sigma$). По линиям CN измерялась колебательная температура паров в пограничном слое. Спектральный метод определения температуры по полосам CN с неразрешенной вращательной структурой достаточно хорошо разработан [3] и основан на измерении относительных интенсивностей в молекулярных полосах.

В рассматриваемом случае расчет температуры проводился по отношению интенсивностей в максимумах полос 4216 Å (0—1) и 4197 Å (1—2). Определяли распределение температуры поперек пограничного слоя, для чего проводили фотометрирование вдоль линии излучения от поверхности исследуемого образца до границы с воздушной плазмой.

Методика позволяет определить температуры от 3000 до 10 000° К с точностью $\pm 400^\circ$ К. Колебательная температура, измеренная данным ме-

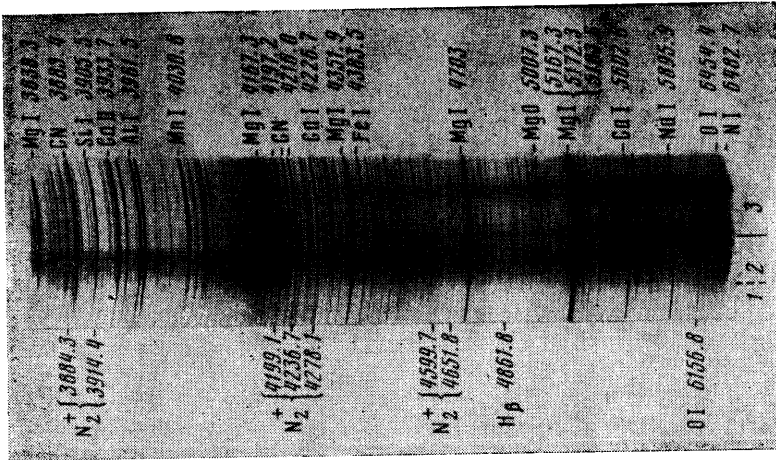
2. Результаты и их обсуждение.

Спектрограмма излучения пограничного слоя разрушающегося материала приведена на фиг. 3. Между разрушающимся образцом 3 и пограничным слоем 2 наблюдается четкая граница, которая проведена условно между набегающим потоком плазмы 1 и пограничным слоем. Анализ спектрограммы показывает наличие сильного излучения пограничного слоя с характерным спектром, который состоит в основном из химических элементов, содержащихся в исходном материале. Зарегистрировано излучение следующих компонентов паров: полосатые спектры химического



Фиг. 2

тодом, характеризует распределение заселенностей колебательных уровней. Достоверность предположения об установлении равновесной колебательной температуры подтверждается соотношением времени колебательной релаксации и времени пребывания малого физического объема газа в пограничном слое. Характерное время пребывания частицы газа в пограничном слое составляло $t_1 \sim 10^{-1}$ сек. Это время определялось по средней скорости движения газа и толщине пограничного слоя, причем скорость в

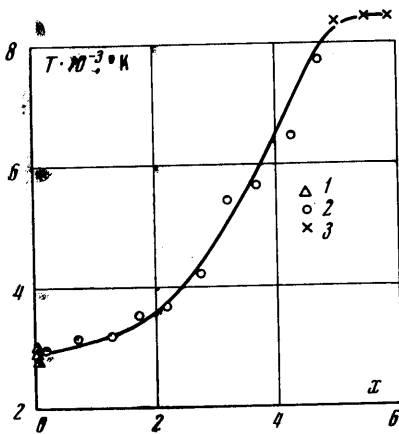


Фиг. 3

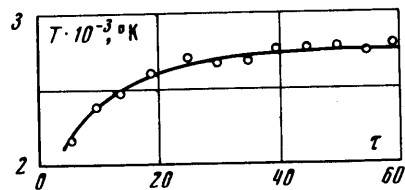
пограничном слое измерялась известным кинематическим методом [4] по траекториям меток яркости. Оценка времени установления равновесного по колебательным уровням нижнего электронного состояния производилась по данным работ [5, 6]; было получено $t_2 \sim 3 \cdot 10^{-5}$ сек. Можно предположить на основании данных работы [7], что для CN сечение неупругих соударений с тяжелыми частицами превышает сечение соударения с электронами, и, следовательно, колебательная температура должна быть равной температуре газа.

Из спектрограммы фиг. 3 видно, что интенсивность излучения полос CN резко падает на внешней границе пограничного слоя. Это можно объяснить начинающейся диссоциацией молекулы CN, которая проходит при температурах выше 8000°K [8].

На фиг. 4 показаны температура разрушающейся поверхности 1, распределение температуры поперек пограничного слоя 2, температура набегающего потока воздушной плазмы 3.



Фиг. 4



Фиг. 5

Температура в набегающем потоке плазмы измерялась по неразрешенному триплету 01 6156 Å при предположении, что газ оптически тонкий и применима известная формула:

$$J = 2.1 \cdot 10^{-10} N f_{ik} \frac{q_i}{Q_i} \exp - \frac{w}{kT} b_\lambda \left(1 - \exp \frac{c_2}{\lambda T} \right) \quad (1)$$

Здесь J , N , f_{ik} , q_i , Q_i , w , k , T , b_λ , c_2 и λ — соответственно полная интенсивность, число частиц, сила осциллятора, статистический вес, статистическая сумма, энергия уровня, постоянная Больцмана, температура, функция Планка, константа и длина волны.

Измеренная температура возбуждения атомов кислорода составляет $8500 \pm 150^\circ \text{K}$ и хорошо совпадает с результатами измерений и соответствует температуре газа.

Для измерения температуры поверхности разрушающегося образца применялся яркостный метод с регистрацией на кинокамеру и спектрограф. Первый основан на применении кино съемки с использованием селективных светофильтров. По кинограммам был определен временной характер изменения температуры поверхности материала (фиг. 5). Эта зависимость позволила определить начало стационарного процесса разрушения, что дало возможность выбрать оптимальный временной интервал для спектральных измерений.

В спектральных измерениях основное внимание уделялось выбору участков с непрерывным излучением, свободных от линейчатого спектра и минимальным излучением пограничного слоя. Эти участки наблюдались на длинах волн $\lambda = 4250, 5750, 6400 \text{ Å}$.

Обычным способом фотографического фотометрирования определялась яркостная температура поверхности, которая затем пересчитывалась в истинную. Значение степени черноты ϵ для материала оценивалось по данным работы [9]. Истинная температура разрушающейся поверхности составляла $2600 \pm 200^\circ \text{K}$.

На основании проведенного исследования предлагается следующая модель пограничного слоя. Газ, образующийся при термическом разрушении образца, вводится на границе газ — тело нормально к поверхности тела. Температура вдуваемого газа на этой границе равна температуре поверхности образца. Профиль распределения температуры пограничного слоя в окрестности критической точки показывает, что имеет место отход пограничного слоя от поверхности разрушающегося образца. Этот отход хорошо просматривается на кинограммах, снятых на инфракрасной пленке (фиг. 2). Отметим, что температурный профиль пограничного слоя, приведенный на фиг. 5, хорошо коррелирует с расчетным, полученным в работе [10].

Знание температурного профиля пограничного слоя дает возможность оценить влияние вдува паров на снижение конвективного теплового потока. Для оценки воспользуемся одномерной моделью, так как сравнительные измерения показали, что влияние бокового прогрева на унос массы и глубину прококсования образца в окрестности критической точки не превышает 5%.

Известно, что теплоперенос конвективным потоком в пограничном слое обусловлен двумя составляющими: кондуктивной за счет теплопроводности и диффузионной за счет рекомбинации и других химических процессов. Кондуктивная составляющая определялась по формуле

$$q_w = -\kappa (\Delta T / \Delta x) \quad (2)$$

Здесь q_w , κ , ΔT , Δx — соответственно тепловой поток к стенке, коэффи-

циент теплопроводности, температура и расстояние по нормали к поверхности образца в критической точке.

Величина $\Delta T / \Delta x$ определялась по температурной кривой на фиг. 5 с точностью 70%. Как показывает оценка, диффузионной составляющей можно пренебречь.

Снижение конвективного потока оценивалось на основании анализа известных численных решений уравнений ламинарного пограничного слоя на проницаемой поверхности.

Для осесимметричного течения при больших вдувах расчет проводился по формуле работы [11]

$$q_w^* = q_w / q_w^* = 1 - 0.76f_e + 0.154(f_e)^2, \quad f_e = \frac{\rho_w u_w}{\rho_e u_e} \sqrt{R} \quad (3)$$

Здесь q_w^* — отношение конвективного теплового потока к стенке с учетом вдува к потоку к стенке без учета вдува, f_e — параметр вдува.

Заметим, что конвективный тепловой поток к неразрушаемой горячей стенке определялся по измеренным потокам к непроницаемой холодной стенке.

Сравнивая результаты расчета теплового потока к разрушающейся стенке по формулам (2) и (3), которые дают 32 и 54 ккал/м²·сек соответственно, можно отметить, что одной из возможных причин расхождения этих величин является то обстоятельство, что коэффициент теплопроводности в расчете по формуле (2) выбирался для чистого воздуха по данным работы [12] из-за отсутствия надежных данных для смеси воздуха и паров разрушающегося материала.

В заключение заметим, что при совместном воздействии на образец конвективного и лучистого тепловых потоков преобладающим механизмом поглощения тепла является снижение конвективного потока при вдуве в пограничный слой газообразных продуктов разрушения материала. Значительный вдув паров в пограничный слой приводит при этом к его отходу от разрушающейся поверхности.

Поступило 8 VII 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. Бувевич Ю. А., Егоров О. К., Якушин М. И. О механизме разрушения полупрозрачных полимеров лучистым тепловым потоком. ПМТФ, 1968, № 4.
2. Райзер Ю. П. Высокочастотный разряд высокого давления в потоке газа как процесс медленного горения. ПМТФ, 1968, № 3.
3. Китаева В. Ф., Алямовский В. Н. Определение температуры нагретых газов по интенсивности полос CN и C₂ с неразрешенной вращательной структурой. Сб. «Оптическая пирометрия плазмы», М., Изд-во иностр. лит., 1960.
4. Трохан А. М. Измерение скорости газовых потоков кинематическими способами. ПМТФ, 1962, № 2.
5. Shin H. K. Effect of molecular orientations on vibrational — translational energy transfer. J. Chem. Phys., 1967, vol. 47, No. 9.
6. Ступоченко Е. В., Лосев С. А., Осипов А. И. Релаксационные процессы в ударных волнах. М., «Наука», 1965.
7. Колесников В. Н. Дуговой разряд в инертных газах. Тр. Физ. ин-та АН СССР им. Лебедева. 1964, т. 30.
8. Thomas G. M., Menard W. A. Experimental measurements of nonequilibrium and equilibrium radiation from planetary atmospheres. AIAA Journal, 1966, vol. 4, No. 2.
9. Wilson R. G., Spitzer C. R. Spectral and integrated emittance of ablation chars and carbon. AIAA Journal, 1969, vol. 7, No. 11.
10. Гершбейн Э. А., Тирский Г. А. Течение вязкого теплопроводного многокомпонентного газа в ударном слое в окрестности притупления при интенсивных вдувах. Научн. тр. ин-та механ. МГУ, 1970, № 1.
11. Мугалев В. П. Влияние вдувания различных газов на теплообмен вблизи передней критической точки затупленного тела. Изв. АН СССР, МЖГ, 1965, № 1.
12. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Физматгиз, 1963.