

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ НА МОДЕЛЯХ, РАЗРУШАЕМЫХ ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНЫМ ПОТОКОМ ГАЗА

Э. Б. ГЕОРГ, М. И. ЯКУШИН

(Москва)

Представлены экспериментальные результаты разрушения моделей из асбобластика и графита высокоэнтальпийным потоком газа. Для моделирования высокотемпературного аэродинамического нагрева от ударного слоя использовался безэлектродный плазмотрон, который позволил изучать на разрушаемых моделях температурный пограничный слой в условиях конвективно-радиационного нагрева. Измеренные по молекуле CN профили вращательной и колебательной температур в многокомпонентном пограничном слое совпали.

1. Под воздействием теплового потока на поверхности моделей, помещенных в струю высокоэнтальпийного газа, образуется многокомпонентный пограничный слой, представляющий собой смесь продуктов разрушения материала, плазмы и продуктов реакций между ними. В дальнейшем для краткости многокомпонентная газовая смесь продуктов разрушения материала и плазмы заменена термином пары. Такой пограничный слой за счет механизмов поглощения частично экранирует излучение от высокотемпературного ударного слоя.

Цель работы заключалась в экспериментальном исследовании вопросов, относящихся к изучению оптических свойств паров. Известно, что решение подобной задачи связано с точным знанием состава паров газа, его температуры и интенсивности излучения.

Для определения температуры паров был выбран относительный метод измерения по молекулярным полосам CN. Измерение температуры по абсолютным интенсивностям излучения в данном случае невозможно, поскольку неизвестно распределение концентраций элементов многокомпонентной смеси поперек пограничного слоя.

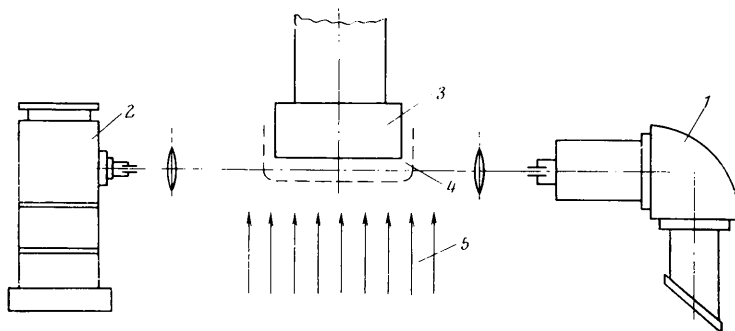
Применение аппаратуры с высоким спектральным разрешением позволило исследовать тонкую структуру вращательных спектров молекул. Степень пространственного разрешения пограничного слоя составляла приблизительно 1/20 его толщины. Профили вращательной и колебательной температур совпали, указывая на то, что измеренная температура соответствует температуре газа, а условия в пограничном слое на разрушаемых моделях из пластика при конвективно-радиационном нагреве в потоке воздушной плазмы близки к равновесным.

Исследования проводились на моделях, изготовленных из высокотемпературных материалов. Подобные исследования в высокоскоростных потоках электродуговых установок затруднены из-за малых размеров пограничного слоя. Это ограничение снимается применением низкоскоростного стабильного потока плазмы, получаемого в установке высокочастотного безэлектродного нагрева. В этих условиях толщина теплового пограничного слоя достигает 2–6 мм.

2. Конструкция и работа установки с индукционным нагревом более подробно рассмотрены в [1]. Для получения высоких температур применялся высокочастотный разряд в потоке различных газов при атмосферном давлении. Температура нагретого воздуха, находящегося в состоянии термодинамического равновесия, на оси струи в рабочем сечении соответствовала 8500° К, электропная концентрация $N_e = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (в других газах эти параметры не измерялись). Скорость потока 30 м/сек, диаметр струи 37 мм, суммарный тепловой поток к неразрушаемой модели 0,4 кВт/см², (конвективная доля 0,3 кВт/см², лучистая 0,1 кВт/см²). В качестве рабочих газов использовались воздух, аргон, углекислый газ, азот, смеси аргона с азотом с различным процентным содержанием.

Исследовались модели из композитного асбопластика и графита, которые имели плоскую форму с цилиндрической головной частью. Это позволило получить в пограничном слое условия, близкие к одномерным вдоль линии наблюдения. Применялись модели длиной 33 и 11 мм, шириной 30 мм, с радиусом головной части 15 мм. Они крепились на двухкомпонентном координатнике, который вводился в рабочее сечение струи, расположенное на высоте 10—15 мм от среза трубки.

На фиг. 1 представлена оптическая схема. Она состояла из призмного спектрографа ИСП-51 с камерой $f=270$ мм (диапазон 3600—10 000 Å,



Фиг. 1

дисперсия 11—342 Å/мм) и дифракционного спектрографа ДФС-13 с плоской решеткой 1200 штр/мм, дисперсией 2 Å/мм в спектре первого порядка и 1 Å/мм в спектре второго порядка и рабочим диапазоном 2000—10 000 Å. Ширина щели 25 мк. С помощью ИСП-51 изучалась колебательная структура системы полос CN, а применение высокоразрешающего спектрографа ДФС-13 позволило получить спектры CN с разрешенной вращательной структурой. При измерении интенсивности излучения модель 3 фокусировалась на щели обоих спектрографов таким образом, что можно было одновременно регистрировать излучения пограничного слоя 4 плазмы 5 и материала модели во время разрушения.

Для исследуемой области применялись пластинки ORWO, WP-I. Калибровка фотопластинок осуществлялась с помощью эталонной вольфрамовой лампы СИ-8-200. Для отождествления длин волн в полосах CN рядом с исследуемым спектром снимался спектр железной дуги. Микрофотометрические измерения проводились на регистрирующем микрофотометре ИФО-451.

Для измерения температуры поверхности изображение исследуемого участка модели фокусировалось на эталонный пирометр ЭОП-66. Излучательная способность асбопластика и графита $\epsilon=0.85$ и 0.8 соответственно.

3. Анализ общей картины излучения пограничного слоя показывает интенсивное излучение полосатых спектров молекул CN и C_2 в видимой и ближней ультрафиолетовой областях, непрерывное излучение сажи, линейчатое излучение атомов.

В качестве пирометрической молекулы был выбран CN, который наиболее удобен для температурных измерений. Спектроскопическое достоинство циана заключается в интенсивном излучении в ультрафиолетовой и видимой областях спектра и наличии его излучения по всей толщине пограничного слоя. Существенную роль при выборе CN в качестве «молекулярного термометра» сыграло отсутствие значительных нарушений вращательной структуры его полос со стороны многокомпонентного пограничного слоя и падающего потока.

На фиг. 2 представлены фрагменты спектров излучения паров асбопластика (*а, б, в*) и графита (*г, д*) в различных газовых средах (*а, г* — воздух, *б* — аргон, *в* — углекислый газ, *д* — смесь аргона с азотом).

Фиолетовая система полос CN обусловлена переходами между вторым возбужденным уровнем $B^2\Sigma$ и основным $X^2\Sigma$ и находится в спектральном интервале 3600—4600 Å. Энергия возбуждения уровня $B^2\Sigma$ составляет примерно 25000 см^{-1} [2].

Вращательная структура полос CN выражена достаточно ярко, наиболее четко выделяются канты следующих полос: 3855 Å (3—3), 3862 Å (2—2), 3871 Å (1—1), 3883 Å (0—0), 4158 Å (4—5), 4168 Å (3—4), 4181 Å (2—3), 4197 Å (1—2), 4216 Å (0—1). Из системы полос были выбраны три, наиболее изученные и имеющие минимальное перекрытие линий. Полосы состоят из *P* и *R* ветвей, каждая линия представляет собой узкий дублет, обусловленный спиновым расщеплением в $^2\Sigma$ состояниях, дублетное расщепление едва разрешается.

Отличительная черта пограничного слоя — наличие в нем мелкодисперсных раскаленных частиц, являющихся результатом разрушения асбопластика. Поэтому излучение фона обусловлено известными механизмами, а также излучением раскаленных мелкодисперсных частиц. При определении интенсивности учитывалась поправка на излучение фона.

Протяженность пограничного слоя менялась в зависимости от исследуемого материала и состава набегающего потока от 2 до 5 мм. Максимальная «толщина» наблюдалась на асбопластике в потоке воздуха, минимальная — в потоке аргона. Интересное строение имеет погранслои на асбопластике в потоке CO_2 . Как видно из фотографии фиг. 2, в, вблизи стенки образуется зона, в которой излучение CN незначительно.

Если возбужденные молекулы имеют равновесное распределение по вращательным уровням, интенсивность линии в полосе, связанная с переходом с вращательного уровня *K*, имеющего энергию E_k , определяется формулой

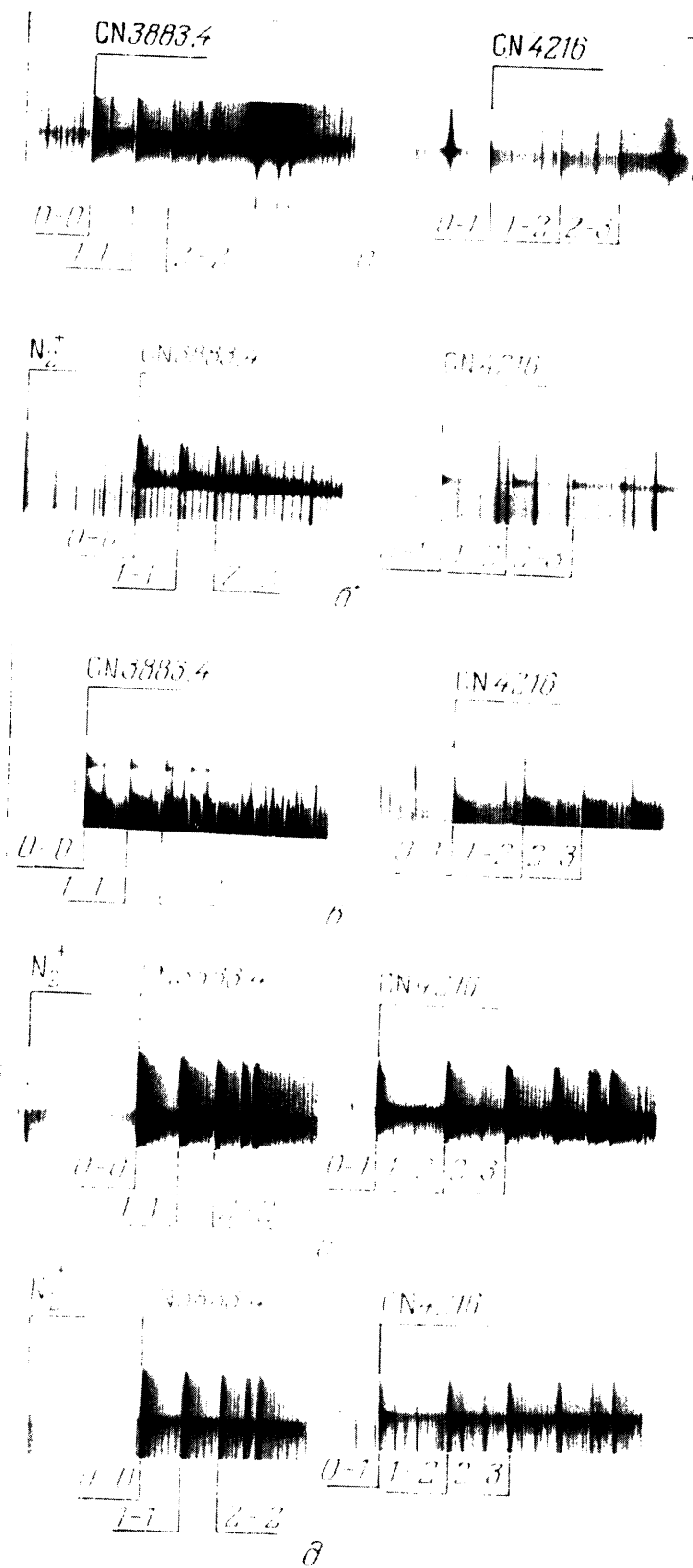
$$I = cA_k v^4 \exp^{-E_k/kT}$$

Здесь A_k — вероятность перехода (включает статистический вес), v — волновое число, k — постоянная Больцмана, T — вращательная температура. $E_k = B_v h c K(K+1)$, где B_v — молекулярная постоянная рассматриваемого колебательного уровня, h — постоянная Планка, c — скорость света, K — вращательное квантовое число возбужденного уровня. Константа C в формуле зависит от концентрации и имеет постоянное значение для всех ветвей данной полосы.

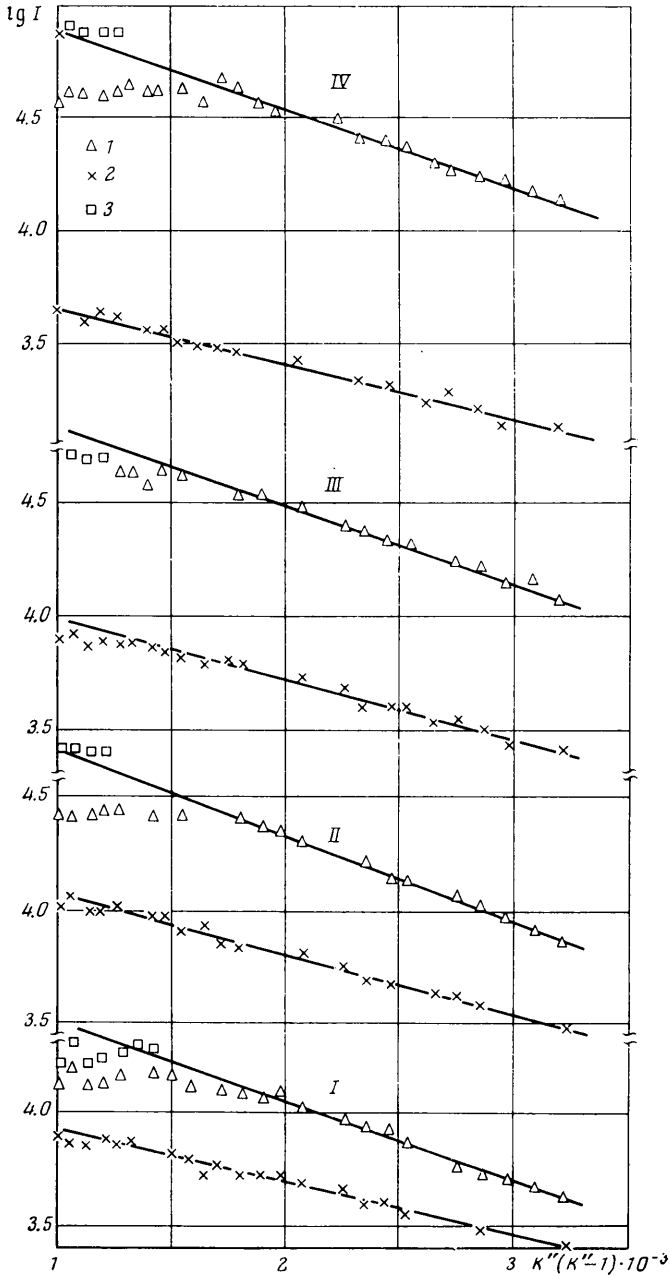
Вращательная температура может быть получена из распределения интенсивностей по различным вращательным переходам в полосе по графику зависимости $\lg I$ от вращательной энергии уровня E_k .

Из формулы следует, что в случае равновесного распределения возбужденных молекул по вращательным уровням этот график представляет собой прямую линию с угловым коэффициентом $B_v h v / (kT)^{-1}$. Известно, что основным источником ошибок при измерении температуры по этому способу является самопоглощение [3]. Наряду с описанным выше графическим методом использовался *O*-метод определения температуры по линиям равной интенсивности в *P* и *R* ветвях [4].

В качестве примера на фиг. 3 приведены графические зависимости $\lg I = f(K''(K'' - 1))$ для перехода (0—1) λ 4216 Å для первых четырех сечений пограничного слоя системы асбопластик — воздух 1. Для остальных шести сечений эта зависимость имеет аналогичный характер. Здесь цифрами I—IV обозначены сечения пограничного слоя от стенки с интервалом 0.5 мм. Можно предположить, что распределение вращательной



Фиг. 2



Фиг. 3

энергии по возбужденным молекулам CN близко к больцмановскому, и поэтому к этим молекулам можно отнести эффективную вращательную температуру, определенную из графиков по тангенсу угла наклона.

Отметим, что во всех сечениях для $K'' < 44$ существует отклонение экспериментальных точек от прямой, которое, как предполагается, связано с влиянием эффекта самопоглощения. Оценка эффекта самопоглощения проводилась на основе экспериментальных данных. Рассматривалось распре-

деление интенсивностей по вращательным уровням в каждом сечении. Сравнение экспериментальных и расчетных распределений для $K \leq 44$ позволило найти вращательные линии с аномальным значением интенсивности, а введение поправки с учетом фактора самопоглощения дало исправленные значения интенсивностей в логарифмических зависимостях 3, фиг. 3.

Как видно из графиков, каждому сечению соответствует свое значение температуры, которое увеличивается по мере удаления от стенки модели. Такое поведение температуры не может быть результатом самопоглощения

Материал	Температура, °K			
	Воздух	Азот	Аргон	Углекислый газ
Асбопластик	2790	2740	2410	2300
Графит	2750	—	—	—

ния, поскольку интенсивность излучения линий к плазме уменьшается и в последнем сечении она на порядок меньше максимального значения.

Таким образом, предполагалось, что отклонение точек для $K'' \leq 44$ в полосе на первых сечениях — результат влияния самопоглощения; характер изменения температуры от сечения к сечению не связан с эффектом самопоглощения. Поскольку эффект самопоглощения связан с оптической глубиной слоя, то обнаружить его влияние можно, меняя либо геометрическую толщину слоя, либо концентрацию CN. Применение укороченных моделей длиной 11 мм позволило уменьшить толщину слоя, а следовательно, и самопоглощение, что видно из фиг. 3, кривые 2. Использование в качестве набегающего потока сред с различным содержанием азота влияло на концентрацию CN.

Цикл исследований в потоках аргона, азота и аргона с небольшой добавкой воздуха показал, что минимальное отклонение от прямой наблюдается в аргоне, максимальное — в азоте. Таким образом, установлено, что в условиях данного эксперимента отклонение от логарифмических прямых связано с эффектом самопоглощения.

Исследовались также модели, выполненные из чистого графита, отличающегося от пластика более простой структурой. Характер логарифмических зависимостей в случае графита сходен с зависимостями для асбопластика с той лишь разницей, что пограничный слой на графите тоньше в 2 раза.

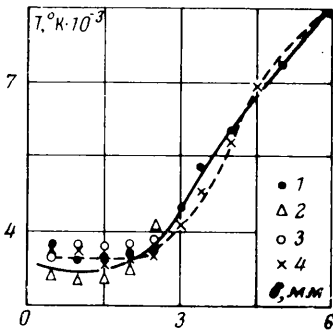
Температуры поверхностей разрушаемых материалов в различных средах, которые измерялись с помощью эталонного пирометра ЭОП-66, приводятся в таблице.

Из таблицы следует, что температура стенки разрушающихся асбопластика и графита одинакова, т. е. температурные условия на внутренней границе пограничного слоя идентичны.

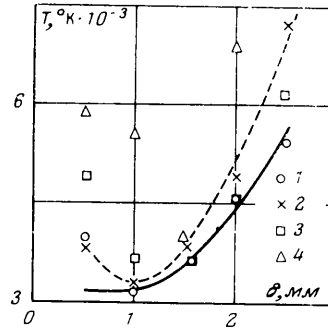
Результаты определения вращательной температуры по наклону логарифмических прямых представлены в виде зависимости температуры от координаты по нормали к поверхности модели на фиг. 4 и 5. Из фиг. 4 видно, что вращательные температуры в полосах (0—1) 1 и (1—2) 2, измеренные графическим способом и 0-методом 3, совпадают в пределах точности эксперимента. Проведенная усредненная кривая дает распределение вращательной температуры поперек пограничного слоя. Пунктирная кривая 4 представляет собой распределение колебательной температуры. Учитывая 10%-ную ошибку метода, можно говорить о совпадении колебательной и вращательной температур и о наличии частичного тер-

модинамического равновесия в пограничном слое в случае асбопластика, обтекаемого потоком воздушной плазмы.

На фиг. 5 представлены температурные измерения на асбопластике в различных газовых средах. В случае азота значения вращательной 1 и колебательной 2 температур близки, т. е. можно говорить о распределении температуры, которое по своему характеру и величине сходно с распределением температуры в случае воздушного пабегающего потока. Распреде-



Фиг. 4



Фиг. 5

ление вращательной температуры в случае аргона 4 носит аномальный характер. В этом случае образование CN происходит во внешних высокотемпературных слоях и связано с подсосом воздуха из окружающей среды. Подъем температуры реальный, так как превышает ошибку эксперимента. Возможно, такое поведение температуры связано с тем, что CN образуется в высоких возбужденных вращательных состояниях, а поскольку его концентрация незначительна, равновесная вращательная температура не устанавливается.

Интересно отметить, что добавка воздуха в аргоновый поток приводит к зависимости 3, которая аналогична 1; однако у самой стенки наблюдается аномально высокое значение температуры, как и в чистом аргоне.

Распределение вращательной температуры в пограничном слое на графитовой модели подобно распределению температуры в аргоне. Это объясняется своеобразным характером разрушения графита, который определяется диффузионными процессами и незначительным вдувом продуктов разрушения в пограничный слой.

Из экспериментального профиля температуры видно, что имеет место отход пограничного слоя от поверхности разрушающейся модели.

Расчеты, проведенные с учетом экспериментального температурного профиля, показывают, что экранирующее действие паров разрушаемого материала уменьшает конвективный тепловой поток к телу на порядок величины.

Авторы благодарны Н. А. Генералову за интерес к работе и плодотворные обсуждения.

Поступила 30 V 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. Георг Э. Б., Рулев Ю. К., Якушин М. И. Исследование теплового потока в передней критической точке тел, обтекаемых высокотемпературным дозвуковым потоком. Изв. АН СССР, МЖГ, 1973, № 5.
2. Каменщиков В. А., Пластинин Ю. А., Николаев В. М., Новицкий Л. А. Радиационные свойства газов при высоких температурах. М., «Машиностроение», 1971.
3. Пеннер С. С. Количественная молекулярная спектроскопия и излучательная способность газов. М., Изд-во иностр. лит., 1963.
4. Knauss H. P., McCay M. S. Temperature determinations from band spectral data. Phys. Rev., 1937, vol. 52, No 41.