

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоцерковский О. М., Северинов Л. И. Консервативный метод «потоков» и расчет обтекания тела конечных размеров вязким теплопроводным газом.— «Журн. вычисл. матем. и матем. физики», 1973, т. 13, № 2, с. 385—397.
2. Бабаков А. В., Белоцерковский О. М., Северинов Л. И. Численное исследование течения вязкого теплопроводного газа у тупого тела конечных размеров.— «Изв. АН СССР. МЖГ», 1975, № 3, с. 112—123.

УДК 532.526

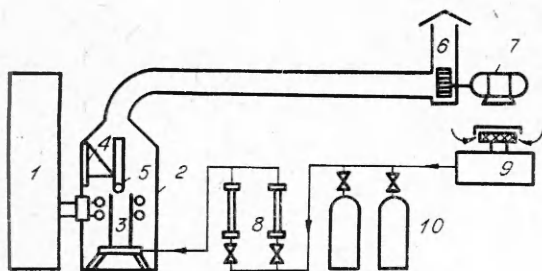
О СТРУКТУРЕ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА РАЗРУШАЕМЫХ МОДЕЛЯХ

Э. Б. Георг, М. И. Якушин

(Москва)

1. Эксперименты проводились на высокотемпературной газодинамической установке, где в качестве нагревателя газа использовался индукционный высокочастотный разряд в потоке воздуха [1]. Схема установки приведена на фиг. 1, где 1 — радиочастотный генератор, 2 — испытательная камера, отделяющая разрядный канал и нагревательный индуктор 3 от окружающей атмосферы, 4 — двухкомпонентный координатник, 5 — исследуемая модель, 6 — вытяжная труба, 7 — центробежный вентилятор с плавнорегулируемой производительностью, 8 — набор расходомеров на тракте подвода газа, 9 — винтовой воздушный компрессор, 10 — баллоны с благородными газами. Установка обычно работала на воздухе от компрессора, создающего избыточное давление 0,25 атм. Для облегчения запуска установки использовался аргон, система подключалась к баллонам. В качестве источника электрической энергии индукционного разряда применялся ламповый радиочастотный генератор, работающий на частоте 17 мГц. Максимальная потребляемая колебательная мощность 50 кВт. Цилиндрический разрядный канал представлял собой кварцевую трубу, на которую наматывался медный двухвитковый соленоид, выполняющий роль нагревательного элемента — индуктора.

В разрядный канал поток газа поступал из форкамеры, где ему придавалось спирально-поступательное движение. Форкамера имела профилированную кольцевую полость, к которой подвод газа осуществлялся тангенциально. В зависимости от интенсивности закручивания падающего газа наблюдаются три газодинамических режима существования разряда. Оптимальным является режим, когда область разряда заполнена горячим газом, разряд отжат от стенки и процесс су-



Ф и г. 1

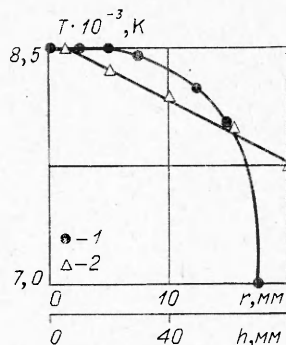
существует неограниченное время. При слабом закручивании газа разряд прилипает к стенке, что приводит к термическому разрушению кварца; при сильном закручивании разряд втягивается вверх по течению и, наконец, сдувается потоками холодного газа. Результаты, приведенные в данной работе, получены при оптимальном газодинамическом режиме существования разряда. Характерная особенность процесса состоит в том, что боковой фронт разряда наклонен к набегающему потоку так, что холодный газ втекает в «пламя» по нормали со скоростью $\sim 10 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ и, нагреваясь, ускоряется в осевом направлении до скорости $\sim 30 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Известно, что механизм получения индукционной плазмы связан с существованием индуцированных импульсов напряжения, что может быть причиной появления пульсаций в плазме. Специально проведенные опыты показали, что интервал времени между импульсами напряжения ($t \sim 10^{-3} \text{ с}$) на несколько порядков меньше времени затухания плазмы ($t \sim 10^{-1} \text{ с}$). Анализ скоростных кинограмм показал отсутствие яркостных пульсаций, т. е. в условиях данного эксперимента пульсирующий характер тока в индукторе не влияет на температурную однородность потока. Радиальное распределение температуры на срезе разрядного канала, представленное на фиг. 2 кривой 1, показывает существование в центральной области достаточно протяженного ядра с постоянной температурой. Зависимость осевой температуры вниз по потоку (кривая 2, фиг. 2) типична для ламинарного течения.

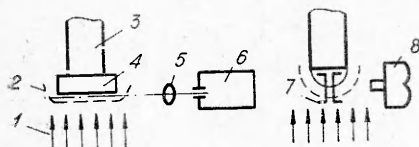
Приведенные на фиг. 2 температурные зависимости — результат усреднения различных температур, измеренных по свечению возбужденных атомных линий кислорода, азота и по разветвленным системам молекулярных полос азота в широком спектральном интервале (0,22—0,96 мк). Таким образом, на оси струи в рабочей части течения, соответствующей срезу кварцевой трубки, температура нагретого воздуха составляла 8500 К, давление $1 \text{ кг} \cdot \text{см}^{-2}$, электронная плотность $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, суммарный тепловой поток к неразрушаемой холодной модели $0,4 \text{ кВт} \cdot \text{см}^{-2}$, радиационная составляющая $0,1 \text{ кВт} \cdot \text{см}^{-2}$. Исследуемые модели устанавливались на двухкомпонентном координатнике, который обеспечивал их перемещение внутри струи в осевом и радиальном направлениях.

2. При обтекании высокотемпературным потоком газа 1 (фиг. 3) модели из асбопластика 4 на ее разрушаемой поверхности возникает пограничный слой 2, состоящий из паров материала, компонентов горячего воздуха и продуктов реакций между ними. Главная цель работы — изучить состав основных компонентов паров поперек пограничного слоя. В опытах применялись модели, имеющие форму плоской пластины шириной 3 см, длиной 3,5 см, с цилиндрической головной частью радиусом 1,5 см. Модели крепились в водоохлаждаемой державке 3, установленной на координатнике. Наличие у потока газа профиля 1 (см. фиг. 2) с постоянной температурой и применение модели плоской формы позволили получить в пограничном слое условия, близкие к одномерным вдоль образующей цилиндрической поверхности головной части модели.

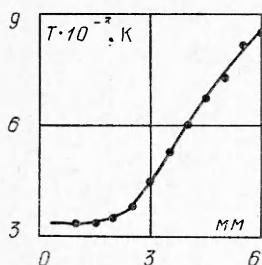
3. Для изучения состава пограничного слоя был выбран метод эмиссионного спектрального анализа. Оптическая



Ф и г. 2



Ф и г. 3



Ф и г. 4

схема измерения излучения паров пограничного слоя в двух проекциях изображена на фиг. 3. Оптическая система (с кратностью увеличения единица) состояла из стандартного объектива 5, дифракционного спектрографа 6 типа ДФС-13 с плоской решеткой 1200 штрих/мм дисперсией $2 \text{ \AA} \text{ мм}^{-1}$. Рабочая ширина щели 30 мк. Модель фокусировалась на щель 7 спектрографа таким образом, что можно было одновременно регистрировать излучение пограничного слоя, модели и плазмы. Тарировка осуществлялась с помощью эталонной воль-

фрамовой лампы СИ-8-200У. Для фотометрирования использовался регистрирующий микрофотометр ИФО-451. Перевод почернений фотослоя в интенсивность осуществлялся с помощью метода гетерохромной фотометрии. Геометрическая длина излучающего пограничного слоя вдоль линии наблюдения определялась по кинограммам, снятым камерой 8 типа КСК-1.

Интенсивность спектральных линий — наиболее естественная спектральная характеристика количественного содержания элемента в пограничном слое. В результате различных физико-химических процессов в пограничном слое устанавливается концентрация возбужденных атомов и ионов, которая определяет интенсивность излучения каждой линии. Интенсивность спектральной линии для оптически тонкого слоя газа длиной l , излучающего в единичный телесный угол и находящегося в состоянии термодинамического равновесия, определяется выражением

$$I = \frac{A_k^j}{4\pi} \frac{g_j}{g_0} N_0 \exp\left(-\frac{E_j}{kT}\right) h\nu l$$

(здесь обозначения общепринятые). Величины g_j , E_j , g_0 , A_k^j брались из справочной литературы [2—4]. Абсолютная интенсивность линий определяется концентрацией возбужденных атомов N_j на верхнем уровне. Их тем больше, чем интенсивнее разрушение материала, определяющее общую концентрацию данного элемента N_0 , и чем энергичнее идет возбуждение атомов.

В расчетах для определения концентраций использовался температурный профиль, измеренный методом относительных интенсивностей по молекулярным полосам CN [5] (фиг. 4). Для данных измерений важно правильно выбрать аналитические спектральные линии. Основным критерием при отборе линий служил состав исходного материала, т. е. определялась концентрация элементов, составляющих существенную часть асбластика.

С точки зрения спектральных измерений выбирались линии, свободные от наложения, а также от помех со стороны соседних, более интенсивных линий. Чтобы уменьшить влияние реабсорбции, преимущественно рассматривались нерезонансные линии с минимальной вероятностью перехода для элементов, концентрация которых значительна в исходном состоянии. В отдельных случаях по линиям мультиплетов проверялось влияние самопоглощения.

Кроме того, из всей совокупности линий данного элемента рассматривались линии с энергией возбуждения $E_j \ll 5 \text{ эВ}$, чтобы избежать влияния более горячего бокового слоя на излучение вдоль линии наблюдения. Предварительно были сняты спектры излучения паров пограничного слоя разрушающегося асбластика в спектральном диапазоне 0,2—0,9 мк. В результате тщательного анализа полученных спектров с учетом вышеизложенного были выбраны следующие спектральные линии, λ : Al I 3944,

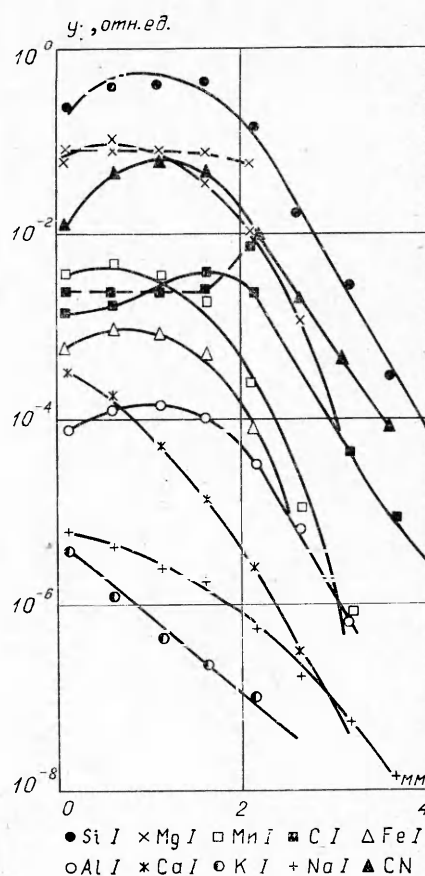
C I 2478, Ca I 6122, Ca II 3934, Fe I 4375, K I 7665, Mg I 4574, Mn I 4783, Na I 5890, Si I 3905.

Результаты измерения распределения концентраций основных компонентов поперек пограничного слоя представлены на фиг. 5 (по оси ординат отложена мольная доля i компоненты y_i). В пограничном слое наблюдаются две характерные зоны. Первая зона протяженностью 2 мм прилегает к стенке разрушаемого материала и имеет постоянное значение температуры. Здесь концентрации продуктов разрушения меняются незначительно. Вторая зона, расположенная в высокотемпературной области, относится к внешней границе пограничного слоя, и для нее характерен резкий спад концентраций всех компонентов.

По характеру изменения концентраций паров поперек пограничного слоя компоненты можно подразделить на три группы.

Кривые, относящиеся к измерениям Ca, Na, K с потенциалом возбуждения $E_j \sim 2-4$ эВ, имеют максимальное значение концентраций у стенки и резко спадают к внешней границе. Концентрации атомов Al, Fe, Mg, Si, и Mn с потенциалом возбуждения $E_j \sim 3-5$ эВ имеют максимум в слое, отстоящем от стенки на расстоянии ~ 1 мм. К этой группе можно отнести и радикал CN, свойства которого более подробно рассмотрены в работе [6]. Концентрация углерода, измеренная по линии C I 2478A с потенциалом возбуждения 8 эВ, имеет максимум, сдвинутый в более высокотемпературную область. К третьей группе относятся молекулярные компоненты C_2 , SiO, MgO, AlO и CaO, концентрации которых не удалось измерить из-за нарушений, вносимых посторонними линиями в их вращательную структуру. Однако следует отметить, что спектры излучения этих соединений наблюдаются у разрушаемой стенки в слоях толщиной $\sim 0,5-2$ мм, причем максимум интенсивности свечения, а следовательно, и концентрации находится на внутренней границе пограничного слоя. Можно предположить, что эти соединения образуются за счет сублимации соответствующих окислов расплава разогретого материала. Таким образом, вблизи стенки состав пограничного слоя в основном определяется продуктами разрушения материала.

Экспериментальные данные сравнивались с расчетными, которые представлены на фиг. 5 штриховыми линиями для элементов Mg и C. Расчет был выполнен для равновесной химически реагирующей системы без учета взаимодействия исходного материала асбопластика с горячим воздухом. Это сравнение имеет смысл только для пристеночной области, состоящей в основном из продуктов разрушения материала, для которой, как видно из фиг. 5, наблюдается хорошее совпадение с расчетом.



Фиг. 5

Таким образом, можно утверждать, что пристеночная область теплового пограничного слоя представляет собой перспективный объект для изучения спектральных коэффициентов поглощения, поскольку в ней с достаточной степенью точности постоянны температура, давление и химический состав.

Авторы выражают благодарность Ю. П. Райзеру за интерес к работе и ценные дискуссии и Ю. К. Рулеву за помощь в проведении эксперимента.

Поступила 18 XI 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. Райзер Ю. П. Высокочастотный разряд высокого давления в потоке газа как процесс медленного горения. — ПМТФ, 1968, № 3.
2. Зайдель А. И., Прокофьев В. К. и др. Таблицы спектральных линий. М., Физматгиз, 1962.
3. Wiese W. L. et al. Atomic transition probabilities. — «Washington National Bureau of Standards», 1969, vol. 2.
4. Корнесс Ч., Бозман У. Вероятности переходов и силы осцилляторов 70 элементов. М., «Мир», 1968.
5. Георг Э. Б., Якушин М. И. Температурный пограничный слой па моделях, разрушаемых высокоэнтальпийным потоком газа. — «Изв. АН СССР. МЖГ», 1976, № 1, с. 26—31.
6. Георг Э. Б., Якушин М. И. Измерение профиля концентрации циана в температурном пограничном слое на моделях, разрушаемых тепловым потоком. — «Изв. АН СССР. МЖГ», 1976, № 3, с. 139.

УДК 532.528

ЗАМЫКАНИЕ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ, ИНДУЦИРОВАННОЙ ПОДВОДНОЙ ИСКРОЙ, ВБЛИЗИ ТВЕРДОЙ СТЕНКИ

В. А. Бурцев, В. В. Шамко

(Николаев)

Знание закономерностей протекания физических процессов, сопровождающих замыкание полостей, образованных подводной искрой, при наличии асимметричных граничных условий весьма важно для правильного понимания причин, возникающих при этом явлении. Известно, например, что пренебрежение энергией гидротока в динамическом расчете конструкций на ударную нагрузку типа взрыва может приводить в ряде случаев к двукратному завышению расчетной энергии источника [1, 2]. Кроме того, ясность в данном вопросе будет способствовать совершенствованию технологии электрогидроимпульсных процессов [3].

Немногочисленные теоретические [4—9] и экспериментальные [10—13] исследования влияния твердой стенки на замыкание сферической полости в жидкой среде указывают на потерю формы полости, образование па заключительной стадии захлопывания струи жидкости в направлении стенки, вызывающей при определенных условиях повреждение последней [9, 13]. Близость стенки является также причиной возникновения поступательного перемещения полости либо ее центра к стенке.

В ряде теоретических работ [5, 6] рассматривается еще и сферическое схлопывание полости, а полученные таким образом количественные характеристики процесса используются в некоторых расчетах [14]. В [13] экспериментально