

УДК 532.542.011.6

ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ, НАГРЕВАЕМЫХ ПОТОКОМ ПЛАЗМЫ

Власов В.И., Залогин Г.Н., Землянский Б.А., Кусов А.Л., Рудин Н.Ф.¹, Тимошенко В.П.²

¹ ЦНИИ машиностроения, Королёв

² НПО "Молния", Москва

E-mail: zalogin_gn@mail.ru, kusov_al@mail.ru

Аннотация

Обсуждаются методы и средства измерений температуры поверхности теплозащитных материалов (ТЗМ) при их испытаниях в высокотемпературных газодинамических установках. Наряду с традиционными средствами измерений температуры поверхности ТЗМ – термопарными и оптическими, приведены данные измерений максимальных температур с помощью кристаллических датчиков. Рассмотрены возможные погрешности термопарных измерений, связанные с наличием внешних и наведенных электромагнитных полей, утечек тепла, электростатического заряда, и погрешности оптических измерений, возникающих за счет собственного излучения плазменной струи, переизлучения нагретых элементов установки и приповерхностного свечения газа, обусловленного образованием в гетерогенных каталитических реакциях электронно-возбужденных молекул. Приведены результаты методических экспериментов по измерению температуры поверхности различными методами, полученные в потоке ВЧ-плазмотрона.

ON SURFACE TEMPERATURE MEASUREMENTS OF MATERIALS HEATED BY THE PLASMA JET

Abstract

Methods and instrumentation for the temperature measurement at the surface of heat-shielding materials (HSM) during their tests in high temperature gas-dynamic facilities are considered. Results of the maximum temperature measurements using crystalline sensors are presented inline with usual instrumentation measurements of the temperature of the HSM surface such as thermocouple and optical systems. Special attention was paid to the consideration of possible errors in thermocouple measurements concerned with external and induced electromagnetic fields, heat losses, electrostatic charge and errors in the optical measurements arising from plasma plume own radiation, re-radiation from hot parts of the facility and surface gas radiation due to electron-excited molecules forming in heterogeneous catalytic reactions. Results of the validation tests on the surface temperature measurements in the HF-plasmatron flow using different methods are also discussed.

1. Измерение тепловых потоков и температур поверхности в ВЧ-плазмотроне

Важным этапом отработки теплозащитных материалов (ТЗМ) летательных аппаратов является испытания образцов в высокотемпературных газодинамических установках (электродуговых и ВЧ-плазмотронах). Температура поверхности материала является одной из основных характеристик, измерение которой необходимо при испытаниях ТЗМ многократного использования на термохимическую стойкость к окислительному действию диссоциированного воздуха и определения их каталитической активности в отношении реакций рекомбинации атомов, а при испытаниях аблирующих ТЗМ – определении эффективной энтальпии разрушения. В области высоких температур ($1000 \leq T_w \leq 2000\text{K}$), которые реализуются на поверхности материалов многократного использования, наибольшее распространение получили два способа измерения T_w : контактный – с помощью термопар, и бесконтактный – оптическими методами, как правило, в инфракрасной области спектра. В летных экспериментах применение оптических средств измерений сопряжено с большими техническими трудностями, поэтому используется первый способ. Каждый из этих способов

имеет свои достоинства и недостатки, которые достаточно хорошо изучены в условиях нагрева испытуемого материала в печах, излучением лазера и т.п. и при известных оптических свойствах поверхности (степени черноты) дают хорошо согласующиеся результаты [1-3].

При обтекании моделей и нагревании образцов материалов плазменным потоком задача измерения температуры поверхности материала существенно усложняется. Применительно к первому способу это связано с влиянием внешних (например, ВЧ-генератор в ВЧ-плазмотроне) и индуцированных в плазме электромагнитных полей, дающих наводки в электрические цепи термодатчиков. Во втором случае – с возможным влиянием собственного излучения плазмы, изменению степени черноты поверхности в процессе ее взаимодействия с диссоциированным и частично ионизованным газом и переизлучением между нагретыми узлами и деталями установки.

Стандартные датчиковые средства измерений [4-8], как правило, изготавливаются и тарируются в условиях, отличных от предполагаемых условий эксплуатации. Поэтому одной из основных задач при подготовке измерительных средств для проведения наземных и летных испытаний является правильный выбор датчиков (принципов их работы и технического исполнения) с точки зрения минимального влияния перечисленных выше факторов на их показания. При использовании стандартных средств измерений (например, термодатчиков измерений температур) или датчиков теплового потока необходима их отработка в газодинамических установках в условиях максимально приближенных к натурным по основным параметрам.

В предлагаемой статье приведены результаты измерений температуры поверхности образцов ТЗМ, нагреваемых плазменным потоком высокочастотного индукционного плазмотрона (ВЧ-плазмотрона), проведенные с помощью различных измерительных средств. Использовались термодатчиковые измерения, кристаллические датчики максимальных температур, оптический пирометр фирмы "Maurer" ($\Delta\lambda = 4.5 - 5.5$ мкм), сканирующая ИК-термовизионная система АГА-780 ($\Delta\lambda = 3 - 5.6$ мкм) и матричная термовизионная система А-40 М ($\Delta\lambda = 7 - 13$ мкм).

Установка и схемы измерений

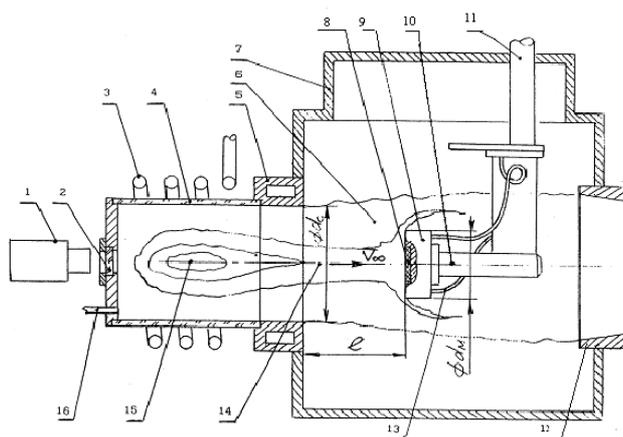


Рис.1.1 Схема установки: 1- пирометр, 2- оптическое окно, 3- индуктор, 4- разрядная камера, 5- сопло, 6- периферийный газовый поток, 7- рабочая часть, 8- образец, 9- державка, 10- втулка, 11- механизм ввода - вывода, 12- диффузор, 13- система водяного охлаждения, 14- поток плазмы, 15- зона разряда, 16- подвод газа.

В ходе проведения многочисленных экспериментов по определению каталитичности материалов и их термохимической стойкости к окислительному воздействию диссоциированного воздуха в дозвуковой струе ВЧ-плазмотрона [9] с одновременным применением двух способов измерения температуры поверхности было обнаружено систематическое различие в измеряемых значениях T_w . Схема установки приведена на

рис. 1.1. Результаты измерений величины T_w оптическими средствами (ИК-сканирующая термовизионная система AGA-780 и ИК-пирометр Mauret) превышали значения этой величины, полученные с помощью термопар. Значения ΔT_w зависят от многих факторов – используемых державок для крепления образцов ТЗМ, их расположения относительно среза сопла, расхода газа и энерговклада.

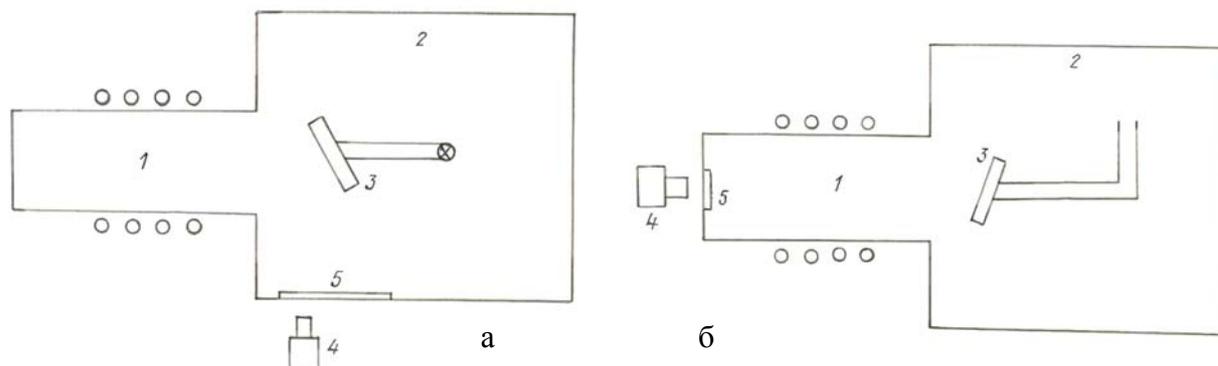


Рис. 1.2 Схемы измерений температуры поверхности испытуемых образцов ТЗМ в ВЧ-плазмотроне: а)–через боковое окно рабочей камеры, б)– через разрядную камеру

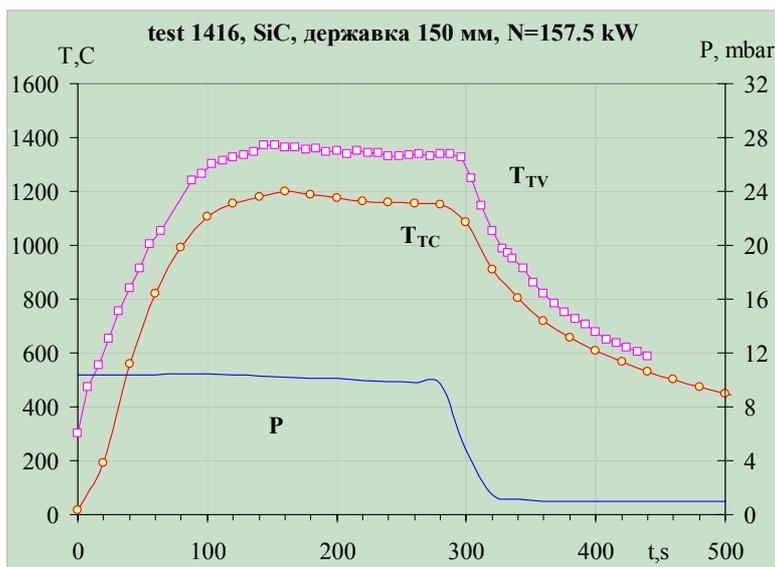


Рис. 1.3 Изменение температуры в процессе испытаний в потоке плазмы
■ – пирометр, ○ – термопара

Для оптических измерений T_w образцов использовались две схемы. Первоначально приемная камера устанавливалась у бокового окна рабочей камеры (рис. 1.2а). Такая схема была приемлемой при испытаниях на термостойкость и определении каталитичности плиточной теплозащиты, имевшей размеры 150×150 мм. В этом случае, плитка устанавливалась под углом $\alpha = 60^\circ$ к вектору скорости потока, и ее поверхность наблюдалась под углом $\sim 30^\circ$ из бокового окна рабочей камеры.

На рис. 1.2 цифрами обозначены основные элементы установки: 1– ВЧ-плазмотрон, 2– рабочая часть, 3– модель на державке, 4 – ИК-камера или пирометр, 5 – окно. При испытаниях образцов ТЗМ малого размера ($D = 25$ мм), помещаемых в торец державки, подробно описанной в [10], измерения T_w по такой схеме не представлялись возможными из-за очень острого угла наблюдения поверхности по схеме рис. 1.2а. Поэтому измерения в испытаниях такого рода проводились через разрядную камеру, в торце которой было установлено окно (рис. 1.2б), пропускающее излучение в данном диапазоне длин волн. Такая схема позволяет кроме абсолютных значений T_w при использовании сканирующей или

матричной ИК-камер получать также ее распределения по поверхности образца, что необходимо для обеспечения точности проводимых исследований.

В некоторых случаях различие в измеренных значениях T_w составляло $\Delta T_w \sim 200 - 250^\circ\text{C}$, что далеко выходит за пределы точности используемых методов измерений и измерительных средств. Результаты измерений температуры двумя способами в ходе испытаний образцов карбида кремния (SiC) показаны на рис. 1.3.

Такое большое различие в температурах, полученное различными измерительными средствами, привело к необходимости проведения тщательного анализа возможных источников погрешностей, связанных в первую очередь с особенностями проведения испытаний ТЗМ в плазменном потоке и наличием электромагнитных полей.

2. Исследования возможных погрешностей термопарных измерений

Необходимость исследований возможности проведения термопарных измерений в условиях летных испытаний возникла в связи с разработкой орбитального корабля Буран и проведением измерений температур поверхности плиточной теплозащиты и материала "Гравимол", применяемого на носке фюзеляжа и кромках крыльев на аппаратах (демонстраторах) серии "Бор-4". Термопары устанавливались как на алюминиевой обшивке корпуса, так и в черном защитном покрытии (ЭВЧ-4МУ-3) [11].

Основными задачами этих пусков являлись:

- исследование тепловых режимов элементов плиточной теплозащиты;
- исследование параметров конвективного теплообмена на поверхности аппарата типа "несущий корпус";
- исследование влияния каталитических свойств поверхности на теплообмен в условиях химически неравновесного потока.

Аналогичные элементы плиточной теплозащиты с термопарами в защитном покрытии применялись для исследований теплообмена аппарата Space Shuttle и показали свою высокую информативность [12-15].

С целью исследования влияния каталитичности поверхности на теплообмен на аппаратах Space Shuttle и Бор-4 некоторые плитки оснащенные термопарами были покрыты высококаталитичными шпинелью в первом случае и платиной – во втором. Как показывают результаты этих измерений на ЛА Бор-4 [16], температура на таких плитках превышает не только соответствующее ее значение на штатной плитке почти на 400°C , но и расчетное равновесное значение. Последнее обстоятельство обусловлено эффектом сверхравновесного нагрева, связанного с увеличением теплового потока при переходе с низкокatalитической поверхности на высококаталитическую [17, 18]. Интерпретация данных летных испытаний, полученных на высококаталитических плитках и вообще температурных датчиках или датчиках теплового потока, каталитичность поверхности которых отлична от ее значения на окружающей поверхности ТЗМ, достаточно сложна и не может быть выполнена без привлечения программ расчета обтекания и теплообмена ЛА сложной формы [19].

Измерения температур с помощью термопар хорошо отработаны, стандартизованы и в обычных условиях имеют очень малые погрешности. В то же время на точность измерения температуры с помощью термопар в условиях контакта с материалами сложного химического состава, наличии плазменного потока и внешних электромагнитных полей могут оказывать влияние следующие факторы:

- форма и размеры изотермических плеч, и их ориентации по отношению к вектору скорости потока, глубина заделки и характер контакта горячего спае с материалом;
- влияние электромагнитного поля ВЧ-генератора на чувствительность регистрирующей аппаратуры;
- погрешности, обусловленные потерями тепла горячим спаем и изотермическими плечами за счет теплопроводности;

- погрешности, обусловленные статическим электрическим зарядом, накапливающимся на поверхности образца в процессе его обтекания ионизованным газом;
- изменения физико-химических свойств материала термопроводов при их длительном нахождении при высоких температурах.

Для выяснения возможного влияния перечисленных факторов на точность показания термопар были проведены многочисленные методические эксперименты с моделями, представляющими собой элементы плиточной теплозащиты ЛА "Буран", с заделанными в защитное керамическое покрытие термопарами различного типа (платина-платино-родиевые, хромель-алюмелевые), имеющие различную длину и конфигурацию изотермических плеч и т.п. Плитка размером 150×150 мм и толщиной 30 – 40 мм помещалась на державке под углом $\alpha \approx 60^\circ$ к вектору скорости потока (рис. 1.2а) и вводилась в поток с помощью пневматического ввода.

На плитках устанавливалось по две термопары с различной длиной изотермических плеч $L = 40$ и 80 мм. При этом измерения проводились при различных ориентациях этих плеч относительно вектора скорости потока (вдоль него и поперек). В результате этой серии экспериментов не удалось выявить зависимость показаний термопар от длины и ориентации плеч. Наряду с традиционной конфигурацией плеч, расположенных на одной прямой проводились эксперименты с использованием "V" – образных плеч, а также термопары с разнесенным спаем, в которых плечи отсутствовали, а термопровода были приварены на расстоянии 2 мм друг от друга к диску из никелевой фольги толщиной 0.1 мм и диаметром 6 мм. В результате проведенных экспериментов было установлено, что форма изотермических плеч не влияет на показания термопар, а во втором случае показания термопар с разнесенным спаем на $\Delta T \sim 20^\circ\text{C}$ ниже штатных, что объясняется результатами численных расчетов температурных полей, проведенных для такой конфигурации.

Эксперименты со специально изготовленными плитками, толщина защитного слоя которых была увеличена до 0.5 мм по сравнению с 0.3 мм у обычных, также не дали различия в показаниях термопар при одинаковых режимах работы установки.

Для выяснения зависимости показаний термопары от качества теплового контакта горячего спая с материалом проводились численные расчеты нестационарной теплопередачи в элементе плиточной теплозащиты. В результате было установлено, что при $t > 25$ с перепад между T_w и горячим спаем термопары (при $D = 0.2$ мм и суммарной длине плеч 40 мм) при хорошем и плохом контакте проводов с материалом не превышает 5°C , что объясняется влиянием лучистой теплопроводности в местах отсутствия контакта. Утечки тепла при выбранной толщине проволоки термопроводов и достаточно большой длине плеч также не оказывают влияния на показания термопар.

Расчетным путем было также установлено, что между температурой горячего спая и температурой термопроводов в месте их выхода из защитного покрытия и входа в кварцевое волокно существует постоянная по времени разность, равная 60 – 100°C . Поэтому, если удельное сопротивление покрытия недостаточно велико, то изотермические плечи шунтируются сопротивлением этого слоя и показания термопар будут ниже температуры горячего спая. Прямые измерения сопротивления покрытия между двумя точками, расположенными на расстоянии $L = 10$ мм, при $T_w = 1000^\circ\text{C}$ показали, что сопротивление $R = 10^6$ Ом, что исключает механизм шунтирования и связанные с этим погрешности.

Влияние переменного электромагнитного поля ВЧ-генератора на показания термопар определялось непосредственно путем включения генератора ($V = 5$ кВ, $I = 17$ А) в отсутствие газового потока при таком же, как в эксперименте, расположении плитки с термопарами в рабочей части установки. Сигнал на термопаре при этом отсутствовал. Аналогично при включенном и выключенном генераторе проводилась градуировка всех регистрирующих приборов.

В ходе экспериментов было обнаружено, что термоэлектроды термопар, заделанных в покрытие плиточной теплозащиты, положительно заряжены относительно земли с $\Delta U = +1,5 - 10$ В. Для выяснения влияния этого фактора на показания термопар и его исключения

проводились эксперименты с термопарами, горячий спай которых был заземлен. Включение и отключение заземления в процессе эксперимента не оказывает влияния на характере регистрируемых кривых $T(t)$.

Проверка термо-ЭДС термопар после серии экспериментов показала, что она соответствует стандарту для термопар данного вида. Поэтому, погрешности, связанные с изменением свойств хромель - алюмелевых термопроводов при длительном нагреве до $T \sim 1000^\circ\text{C}$ (так называемый дрейф ЭДС [20]) также можно исключить из рассмотрения.

Кроме описанных выше измерений T_w термопарами, которые были заделаны в керамическое покрытие плиточной теплозащиты, проводились многочисленные испытания теплозащитных материалов с использованием державки для крепления образцов, в которых термопара находилась в изотермической полости, расположенной за образцом. Контакт горячего спаю с материалом и плазмой при этом отсутствовал. Несмотря на это различие между показаниями термопары и пирометра в некоторых случаях оказались весьма велики и достигали $\Delta T_w \approx 250^\circ\text{C}$. Эксперименты, проведенные с образцами карбида кремния в потоке диссоциированного воздуха при двух значениях давления $P = 10$ и 50 мбар, показали, что разница показаний термопары и пирометра не зависит от давления и слабо возрастает с энерговыделением (или с самой измеряемой величиной температуры).

Таким образом, проведенные всесторонние исследования факторов, могущих вызвать неточность определения температуры с помощью термопар, показали, что все многочисленные источники погрешностей применяемой методики не объясняют расхождения в показаниях термопар и оптических средств измерений.

3. Исследования возможных погрешностей оптических измерений

Основными источниками погрешностей при оптических измерениях температуры являются:

- возможное свечение газа в спектральной области пирометра;
- недостаточно точное знание степени черноты материала в заданном интервале длин волн и высоких температурах;
- наличие фонового излучения нагретых элементов установки;
- образование на поверхности образца, помещенного в поток плазмы, электронно и колебательно-возбужденных молекул, излучающих в спектральном интервале пирометра.

Воздушная плазма ($P \sim 10 - 175$ мбар, $T \sim 5000 - 10000\text{K}$) прозрачна в ИК-диапазоне длин волн ($\lambda \geq 3.5$ мкм), и применение схемы рис. 1.2б оправдано. Это подтверждается как расчетными данными [21], так и фактом отсутствия сигнала в ИК-камере или пирометре при работающем плазмотроне и не введенной в поток модели. При использовании приборов, работающих в диапазоне более коротких волн (ближе к максимуму интенсивности излучения черного тела $\lambda_{\text{MAX}} = 2280/T_w$) данный вопрос требует уточнения. Исключение из рассмотрения погрешности измерений T_w за счет этого фактора возможно только при проведении экспериментов в воздушной плазме. При работе ВЧ-плазмотрона на углекислом газе или его смеси с азотом (моделирование атмосфер планет Марс и Венера) наблюдается заметное свечение газа в ИК-области спектра, что может вносить заметную погрешность в значение T_w [22].

Влияние устанавливаемого на пирометре значения спектральной степени черноты ϵ_λ на величину регистрируемой температуры показано в таблице 3.1. В этом эксперименте (воздух, $N = 175$ кВт, $P = 25$ мбар) при испытаниях материала (SiC) на квазистационарном участке изменения T_w от времени ($t > 100$ с) при фиксированных значениях энерговыдела и давления изменялось значение ϵ_λ на шкале пирометра.

Таблица 3.1.

ϵ_λ	0,8	0,85	0,9	0,95	1,0
T_w , К	1967	1889	1819	1753	1710

При измерении величины ε_λ в вакууме или среде инертного газа температура образца измеряется с большой точностью. Поэтому погрешность измерений ε_λ не превышает 2 – 3 % и не может приводить к существенной (наблюдаемой в описываемых экспериментах) разнице в регистрируемых различными способами значениях T_w .

Значительно более сложным и менее изученным является процесс образования в гетерогенных каталитических реакциях электронно- и колебательно возбужденных молекул. Этот вопрос непосредственно связан с распределением энергии, выделяющейся в поверхностных реакциях, между исходными компонентами, продуктами реакции и катализатором (в нашем случае поверхностью ТЗМ). Экспериментально установлено [23, 24], что коэффициент аккомодации химической энергии β в реакциях гетерогенной рекомбинации атомов азота могут быть значительно ниже 1 (для вольфрама при $T = 1600\text{K}$, $\beta = 0.2$, для меди при $T = 300 - 340\text{K}$, $\beta = 0.2 - 0.8$). При этом значительная доля энергии идет на возбуждение внутренних степеней свободы образующихся молекул, которые десорбируются в возбужденных состояниях с последующей дезактивацией за счет столкновений или радиационных переходов в газовой фазе [25]. Это явление является причиной наблюдаемого в различных областях спектра приповерхностного свечения космических летательных аппаратов, в частности ЛА "Space Shuttle" [26].

Механизм возникновения такого приповерхностного свечения на больших ($h > 100\text{ км}$) высотах в условиях свободномолекулярного течения обусловлен в первую очередь столкновениями высокоэнергетических частиц с поверхностью ($\sim 5\text{ эВ}$ для атомов и $\sim 10\text{ эВ}$ для молекул) и в меньшей степени энергией рекомбинации атомов атмосферного кислорода на поверхности ЛА. В дозвуковом потоке диссоциированного газа, генерируемого в ВЧ-плазматроне, аналогичные процессы обусловлены перераспределением энергии рекомбинации атомов (для кислорода $E_d = 5.1\text{ эВ}$, для азота $E_d = 9.8\text{ эВ}$). Свечение молекул N_2 в диапазоне длин волн 590 нм, имеющее максимум интенсивности на поверхности, наблюдалось на модели из карбида кремния в струе воздушной плазмы [27]. Поскольку результаты, полученные в упомянутых исследованиях, имеют непосредственное отношение к рассматриваемому вопросу, кратко приведем их содержание.

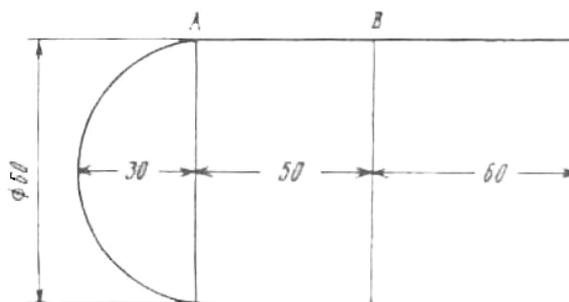


Рис.3.1 Модель для исследования приповерхностного свечения

При низких давлениях газа $P \sim 10$ мбар пограничный слой у поверхности модели имеет толщину $\delta \sim 10$ мм, что позволяет измерять интенсивность излучения с хорошим разрешением по нормальной к поверхности координате. Измерения интенсивности приповерхностного свечения газа вблизи модели, помещенной в поток плазмы, проводились на боковой поверхности модели сфера-цилиндр из карбида кремния (SiC) в сечениях А и В (рис. 3.1) по методике, описанной в [28]. Диаметр ее сферического затупления составлял 60 мм. В сечении В поверхность модели была покрыта тонким слоем высококаталитического серебра. На рис. 3.2 показано распределение относительной интенсивности излучения по координате, перпендикулярной оси модели, а на рис. 3.3 распределение интенсивности после преобразования Абеля. Кривыми 1 и 2 показаны интенсивности излучения вблизи некаталитической (SiC), а кривыми 3 и 4 каталитической (серебро) поверхностей. Кривые 1 и 3 относятся к излучению с длиной волны $\lambda = 569\text{ нм}$, а кривые 3 и 4 – $\lambda = 550\text{ нм}$. Ход

кривой 2, показывающий увеличение интенсивности излучения вблизи относительно холодной поверхности модели, служит свидетельством того, что она является источником частиц, вызывающих излучение данной длины волны. Одним из возможных (и наиболее вероятных) механизмов образования электронно-возбужденных молекул являются каталитические реакции рекомбинации [25].

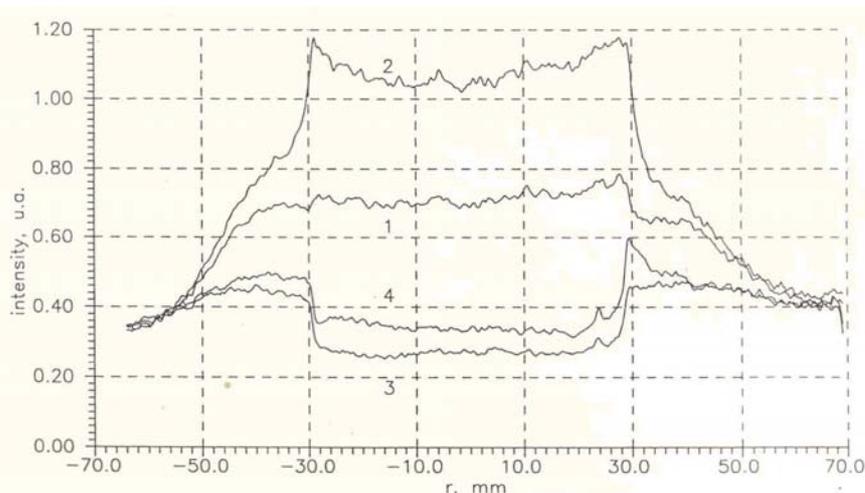


Рис.3.2 Радиальное распределение интенсивности излучения молекул N_2 в сечениях А и В на разных расстояниях от лобовой точки модели. 1, 2 – 35 мм, 3, 4 – 85 мм, 1, 3 – $\lambda = 550$ нм, 2, 4 – $\lambda = 5.690$ нм
Область $-30 > r > 30$ мм – пограничный слой, $-30 < r < 30$ мм – излучение газа на фоне поверхности модели

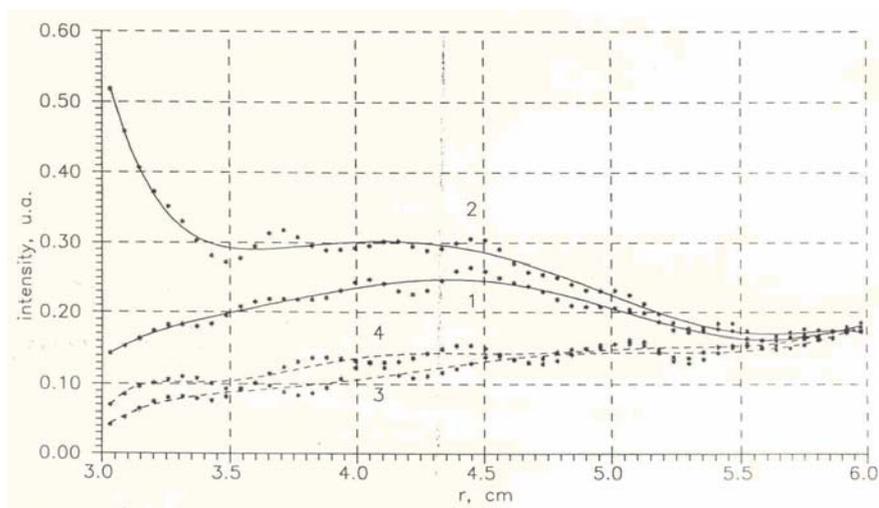


Рис.3.3 Радиальное распределение интенсивности излучения молекул N_2 после преобразования Абеля.
1, 2 – некаталитическая поверхность (сечение А); 3, 4 – каталитическая поверхность (сечение В).
1, 3 – $\lambda = 550$ нм, 2, 4 – $\lambda = 5.690$ нм. $r = 3$ см – поверхность модели

Для определения интенсивности приповерхностного свечения в ИК-области спектра были проведены специальные экспериментальные исследования, в которых теплозащитная плитка устанавливалась перпендикулярно вектору скорости потока, а измерения с использованием сканирующей ИК-камеры АГА-780 проводились через боковое окно рабочей части установки (по схеме рис. 1.2а) вдоль поверхности плитки. В свободной струе (при работающем плазмотроне в отсутствии модели) измеренная ИК-камерой температура фона ($\varepsilon = 1$, $N = 100$ кВт, $P = 10$ мбар) не превышает $T = 40^\circ\text{C}$ (рис. 3.4).

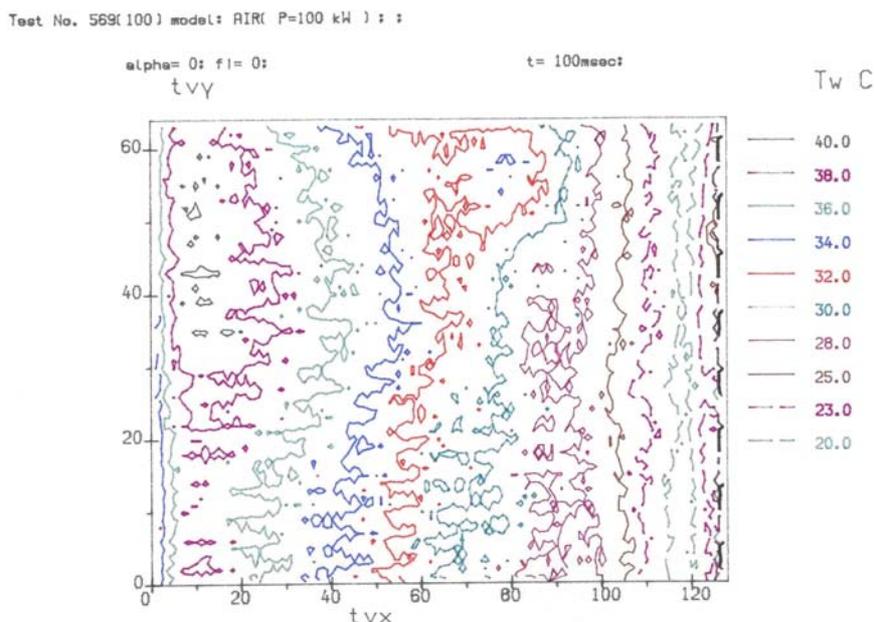


Рис. 3.4 Излучение свободной струи в ИК-диапазоне

При вводе модели излучение фона (зона В) существенно возрастает (до 170°C), а по мере приближения к поверхности (зона А) достигает значения ~ 800°C (рис. 3.5). Прямая линия на рис. 3.5 соответствует границе плитки. Для определения пространственного разрешения термовизионной системы (размытие изображения вблизи границы) в условиях описываемых экспериментов проводилась съемка тонкой ($D \sim 0.5$ мм), нагреваемой электрическим током, проволоки (которая показана в нижней левой части рис. 3.5). Видно, что изображение размазывается незначительно.

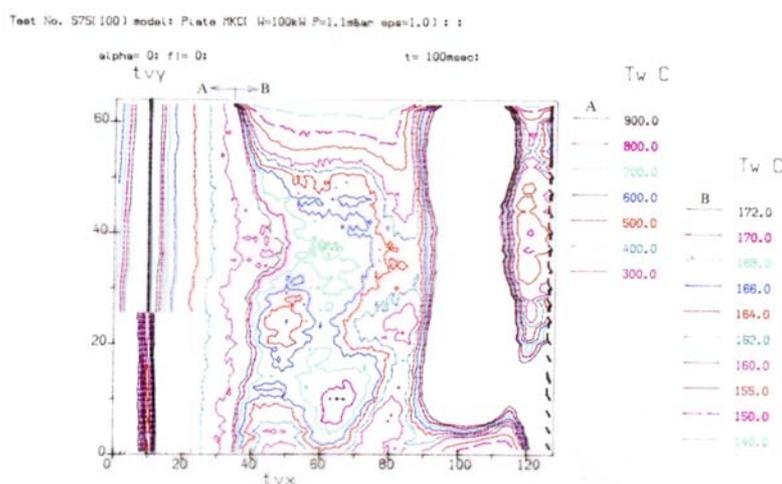


Рис. 3.5 Распределение температуры в набегающем потоке и в пограничном слое перед плиткой

Проведенные исследования указывают на присутствие вблизи модели, обтекаемой диссоциированным воздухом, источников ИК-излучения, которыми могут быть колебательно- возбужденные молекулы, образующиеся в гетерогенных реакциях и излучающих в диапазоне длин волн $\Delta\lambda = 3 - 5$ мкм. Наиболее вероятными источниками излучения являются молекулы NO и NO₂, или молекулы примесей CO₂, CO, OH. Кроме того, при взаимодействии рассматриваемых материалов, в частности SiC, с потоком плазмы, происходит потеря массы. Продукты разрушения могут также служить источниками

излучения в спектральном диапазоне прибора. Экспериментальных исследований состава и состояние продуктов разрушения, поступающих в пограничный слой, не проводилось. Поэтому для определения количественных данных и выяснения механизмов возникновения такого рода свечения необходима постановка специальных экспериментов. При этом следует иметь в виду, что на разных материалах механизмы образования возбужденных молекул могут различаться, а количественные характеристики процессов могут зависеть от каталитических свойств материала или покрытия в отношении реакций рекомбинации атомов азота и кислорода.

Перечисленные выше факты свидетельствуют о том, что наиболее вероятной причиной различия измеряемых значений T_w различными методами является присутствие в окрестности модели источников излучения в инфракрасной области спектра. В этом случае в простейшем приближении объемного высвечивания прибор регистрирует величину

$$I = I_w + \iint I_{\text{газ}} d\lambda d\ell$$

Здесь I_w – излучение поверхности ТЗМ, $I_{\text{газ}}$ (Вт/м³мкм) – интенсивность излучения газа. Интеграл берется в диапазоне длин волн ИК-камеры по толщине возмущенной моделью области.

Погрешности определения T_w оптическими методами, обусловленные рассмотренным явлением, зависят от многих факторов, таких как размер и материал моделей, диапазон длин волн применяемых измерительных средств, условий экспериментов, определяющих толщину пограничного слоя около модели.

4. О роли переизлучения на формирование термовизионного изображения при испытаниях образцов ТЗМ в ВЧ-плазмотроне

При исследованиях теплообмена и определении температуры поверхности ТЗМ с помощью сканирующей или матричной термовизионной системы в поле зрения прибора кроме исследуемого объекта (поверхности модели или образца, закрепленного в державку), попадают также элементы и узлы установки. Причем элементы установки, например, неохлаждаемая державка из SiC или силицированного углеродного материала, будучи нагретыми до высоких температур, создают фон, на котором границы образца трудноразличимы. Кварцевая труба и сопловой блок, являясь хорошими отражателями, также дают дополнительные изображения в поле зрения ИК-камеры, обусловленные отраженным излучением, которые затрудняют расшифровку термовизионных изображений и интерпретацию экспериментов. Это приводит к необходимости разработки методики и программы, позволяющих на этапе подготовки экспериментальных исследований при выбранной конфигурации соплового блока, формы и размеров державки для крепления испытуемых образцов ТЗМ, выбрать расстояние от среза сопла и используемый объектив ИК-камеры таким образом, чтобы минимизировать влияние паразитных факторов.

В случае зеркально отражающих поверхностей описанная выше задача в принципе может быть решена в рамках геометрической оптики. Однако из-за весьма сложной геометрии рассматриваемой задачи применительно к высокотемпературным газодинамическим установкам (в частности ВЧ-плазмотрону) и возможного диффузного отражения излучения от различных элементов, данная задача решается численно методом прямого статистического моделирования.

Постановка задачи

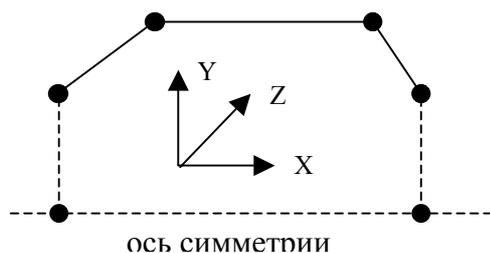


Рис. 4.1 Схематическое изображение замкнутой области

Решается задача о переизлучении в замкнутой области, обладающей осевой симметрией как показано на рис. 4.1. Область образована вращением замкнутого контура вокруг оси симметрии. Контур состоит из N прямых линий. При вращении, каждая линия контура образует элементарную площадку (поверхность). Каждая поверхность может в общем случае поглощать и рассеивать излучение. Предполагается, что пространство между рассматриваемыми излучающими площадками заполнено газом, который является оптически прозрачным в данном спектральном диапазоне. При

проведении исследований теплообмена в потоке высокотемпературного воздуха с использованием приборов, работающих в ИК-диапазоне длин волн (термовизионные системы АГА-780, А-40, пирометр фирмы Maurer) прозрачность газа подтверждена экспериментально.

Энергия излучения, проходящая через площадку площадью dS за время dt для равновесного излучения согласно [29, 30] определяется по формулам

$$E = dt dS \varepsilon \sigma T_w^4$$

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} = 5.6705119 \times 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 К^4} \quad (4.1)$$

где ε – интегральная излучательная способность, T_w – температура поверхности, σ – постоянная Стефана-Больцмана.

Энергия, падающая на площадку, поглощается, проходит внутрь материала и отражается поверхностью. Доли этих энергий выражаются соответственно через коэффициенты отражения r , пропускания ρ и излучательную способность ε . Из баланса энергий следует:

$$r + \rho + \varepsilon = 1 \quad (4.2)$$

Данные коэффициенты, вообще говоря, зависят от спектрального диапазона излучения.

Для описания процесса отражения излучения используется зеркально-диффузная модель. Предполагается, что доля фотонов, равная α_w рассеивается поверхностью диффузно, оставшаяся доля, равная $1 - \alpha_w$ отражается поверхностью зеркально.

Решение уравнения переноса излучения с помощью метода прямого статистического моделирования Монте-Карло

Существует большое количество различных методов решения поставленной задачи о переносе излучения между площадками в прозрачной среде. Если поверхности рассеивают излучение диффузно, используется метод, основанный на вычислении так называемых угловых коэффициентов [29]. В случае, когда излучение отражается всеми поверхностями зеркально и существует только одна излучающая поверхность, можно решать задачу методами геометрической оптики. В переходной области одним из наиболее простых способов решения является метод прямого статистического моделирования Монте-Карло [30]. Преимущество данного способа состоит в возможности моделирования переноса излучения между площадками с произвольными законами взаимодействия фотонов с поверхностью. Недостаток данного метода состоит в затратности машинных ресурсов, необходимых для получения результатов с высокой степенью точности. При этом используемый метод не имеет принципиальных ограничений на точность получаемых

результатов. В последнее время широкое распространение получили многопроцессорные вычислительные комплексы. Подобный комплекс существует в настоящее время в ЦНИИ машиностроения. Как показали расчёты, поставленная задача может быть решена методом прямого статистического моделирования Монте-Карло в разумные сроки на существующих многопроцессорных комплексах.

Метод прямого статистического моделирования Монте-Карло основан на рассмотрении движения фотонов, генерируемых на излучающих поверхностях. Алгоритм состоит из следующих этапов:

- генерирование фотонов на поверхностях.
- расчёт точки столкновения фотона со следующей поверхностью.
- определение поглотился фотон, прошёл внутрь материала или отразился от поверхности.
- вычисление нового направления движения фотона.
- расчёт изображения, создаваемого оптической системой при попадании фотона на объектив.

Схема расчета интенсивности излучения в методе прямого статистического моделирования представлена на рис. 4.2, γ – случайная величина, равномерно распределённая в интервале $[0,1]$, с вероятностью α_w – фотон отражается диффузно, с вероятностью $(1-\alpha_w)$ – фотон отражается зеркально, при этом меняет знак нормальная относительно поверхности составляющая скорости, ε – излучательная способность, ρ – коэффициент пропускания поверхности.

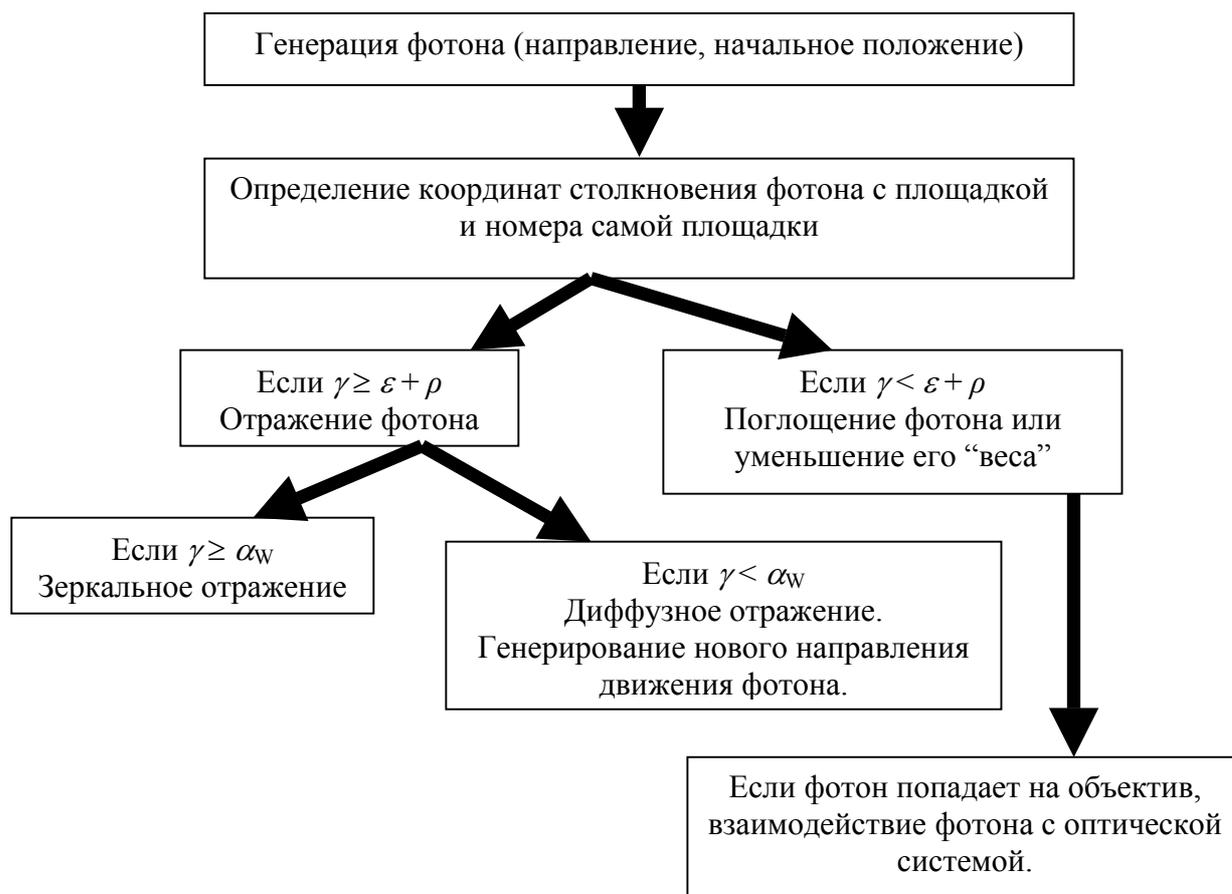


Рис. 4.2 Схема решения задачи методом прямого статистического моделирования Монте-Карло.

При излучении фотона плоскостью, его направление генерируется случайным образом, как

$$\begin{aligned} \varphi &= 2\pi\gamma_1, \quad \theta = \arccos(\sqrt{\gamma_2}) \\ l_n &= \cos(\theta), \quad l_{t_1} = \sin(\theta)\cos(\varphi), \quad l_{t_2} = \sin(\theta)\sin(\varphi) \\ \bar{l} &= -l_n\bar{n} + l_{t_1}\bar{t}_1 + l_{t_2}\bar{t}_2 \end{aligned} \quad (4.3)$$

где \mathbf{n} – внешняя по отношению к расчётной области нормаль к поверхности, \mathbf{t}_1 и \mathbf{t}_2 – два ортогональных друг другу вектора, лежащих в плоскости поверхности (векторы \mathbf{n} , \mathbf{t}_1 и \mathbf{t}_2 определяются для точки старта фотона), γ_1 и γ_2 – случайные величины, равномерно распределённые в интервале $[0,1]$. При равновесном излучении газа и поверхностей полная энергия излучения в единицу времени в интервале частот $[\nu, \nu+\Delta\nu]$ определяется формулой:

$$\begin{aligned} E_\nu &= \sum_{i=1}^{N_f} \varepsilon_\nu \sigma_\nu T_w^4 S_f \\ \sigma_\nu &= \frac{1}{\varepsilon_\nu \Delta\nu T_w^4} \int_\nu^{\nu+\Delta\nu} \varepsilon_\nu B_\nu(T_w) d\nu \end{aligned} \quad (4.4)$$

где B_ν – равновесная планковская интенсивность излучения, T_w – температура поверхности, ε_ν – спектральная излучательная способность, S_f – площадь поверхности. Количество рождающихся фотонов N_{ph} задаётся, энергия e_ν каждого фотона в интервале частот $[\nu, \nu+\Delta\nu]$ определяется из соотношения:

$$e_\nu = E_\nu / N_{ph}$$

Для расчёта точки столкновения фотона с границей определяется время t пересечения траектории движения фотона с каждой площадкой:

$$X = X_0 + Ut, \quad Y = Y_0 + Vt, \quad Z = Z_0 + Wt \quad (4.5)$$

В осесимметричном случае для описания грани ячейки используется уравнение конуса:

$$Y^2 + Z^2 = \left(\frac{(Y_f - Y_i)}{(X_f - X_i)} (X - X_i) + Y_i \right)^2 \quad (4.6)$$

В плоском случае используется уравнение прямой линии:

$$Y = \frac{(Y_f - Y_i)}{(X_f - X_i)} (X - X_i) + Y_i \quad (4.7)$$

где X_0, Y_0, Z_0 – координаты начального положения фотона, X_i, Y_i и X_f, Y_f – координаты начала и конца вершин рассматриваемой площадки (усечённого конуса), U, V, W – составляющие вектора скорости фотона. После проведения преобразований с учетом осесимметричной геометрии, имеем:

$$\begin{aligned} At^2 + Bt + C &= 0 \\ A &= (U(Y_f - Y_i))^2 - (V^2 + W^2)(X_f - X_i)^2 \\ B &= 2((Y_f - Y_i)U(Y_i(X_f - X_0) - Y_f(X_i - X_0)) - (Z_0W + Y_0V)(X_f - X_i)^2) \\ C &= (Y_i(X_f - X_0) - Y_f(X_i - X_0))^2 - (Y_0^2 + Z_0^2)(X_f - X_i)^2 \end{aligned} \quad (4.8)$$

Для случая плоской геометрии:

$$\begin{aligned}
 Bt + C &= 0 \\
 B &= U(Y_f - Y_i) - V(X_f - X_i) \\
 C &= (X_0 - X_i)(Y_f - Y_i) - (Y_0 - Y_i)(X_f - X_i)
 \end{aligned}
 \tag{4.9}$$

В случае осесимметричной геометрии задача может иметь одно, два, либо ни одного решения. При этом находится пересечение траектории фотона (4.5) с двумя конусами (4.6). Решение для мнимого конуса следует отбросить, для этого достаточно потребовать выполнения условия:

$$(X - X_0) \left(\frac{1}{2}(X_f + X_i) - X_0 \right) \geq 0, \quad X_0 = \frac{X_i Y_f - Y_i X_f}{(Y_f - Y_i)}
 \tag{4.10}$$

Это условие расположения концов отрезка $[X_i, X_f]$ и точки выхода фотона из ячейки по одну сторону от центра конусов, с координатами $(X_0, 0, 0)$.

Необходимо также отбросить решение, когда точка пересечения выходит за границы отрезка с координатами начала (X_i, Y_i) и конца (X_f, Y_f) :

$$\begin{aligned}
 X < \min(X_i, X_f) \text{ или } X > \max(X_i, X_f) \text{ или } R < \min(Y_i, Y_f) \text{ или } R > \max(Y_i, Y_f) \\
 R = Y \text{ в плоском случае} \\
 R_2 = Y_2 + Z_2, \text{ в осесимметричном случае.}
 \end{aligned}
 \tag{4.11}$$

Это условие не удобно для практического использования, поэтому обычно используется модифицированное условие:

$$\begin{aligned}
 (X - X_i)(X_f - X_i) + (Y - Y_i)(Y_f - Y_i) &\geq 0 \\
 (X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2 &\leq (X_f - X_i)^2 + (Y_f - Y_i)^2
 \end{aligned}
 \tag{4.12}$$

Это условие положительности косинуса угла между векторами $(X - X_i, Y - Y_i)$ и $(X_f - X_i, Y_f - Y_i)$, а также малости длины первого вектора относительно второго.

В плоском и осесимметричном случаях, если фотон влетел в ячейку через рассматриваемую грань, модуль одного из решений мал по сравнению со вторым, в этом случае берётся максимальное по модулю решение, либо решение отбрасывается, если оно одно.

Для всех граней отбрасываются решения с отрицательным временем. Затем выбирается минимальное решение из решений для всех граней, удовлетворяющим всем перечисленным условиям.

Новая координата столкновения фотона с поверхностью (X, Y, Z) определяется по формулам (4.5), затем проводится процедура столкновения фотона с поверхностью. При этом возможны следующие варианты: поглощение, отражение, преломление на границе различных сред. Фотон поглощается и проходит внутрь материала с вероятностью $\varepsilon + \rho$, соответственно отражается с вероятностью $1 - \varepsilon - \rho$. При отражении используется зеркально-диффузная модель отражения фотона поверхностью.

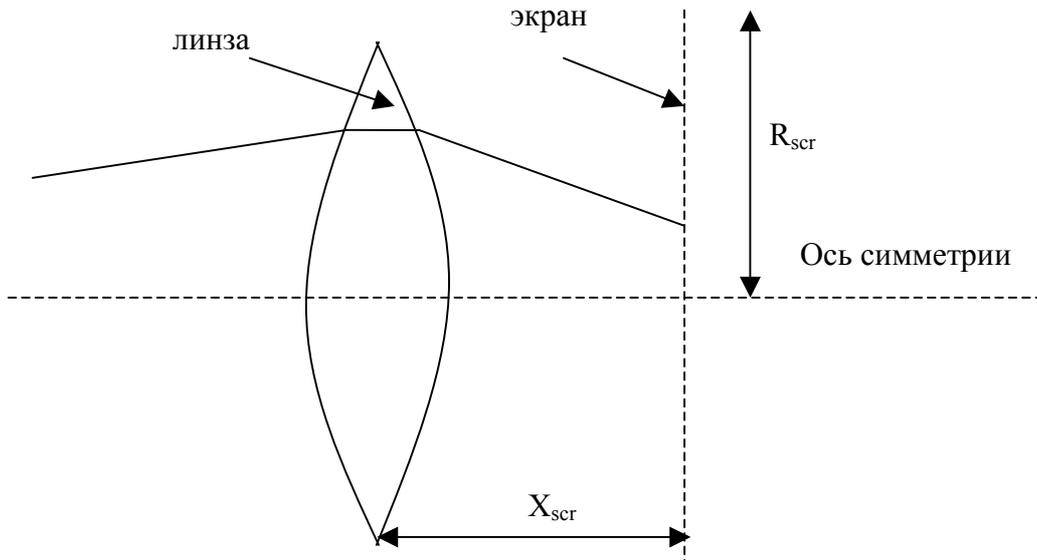


Рис. 4.3 Взаимодействие фотона с оптической системой

Для получения изображения, взаимодействие фотона с реальной оптической системой заменяется более упрощенным вариантом, как показано на рис. 4.3. Фотон попадает на тонкую линзу, два раза преломляется, после чего попадает в определённую точку экрана (фотопластинки), где формируется изображение. Экран радиуса R_{scr} ставится на расстоянии X_{scr} от линзы (объектива):

$$X_{scr} = \frac{af}{a-f}, \quad R_{scr} = \frac{R}{a} X_{scr} \quad (4.13)$$

где a – предполагаемое расстояние от объекта до объектива, R – предполагаемый радиус объекта. Величины a и R условны, так как изображение формируется как прямым излучением непосредственно от объекта, так и рассеянным излучением. Величины a и R служат для оценки размера формирующегося изображения. Фокусное расстояние f линзы равно:

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (4.14)$$

Где n – коэффициент преломления, R_1, R_2 – радиусы кривизны линзы. Нормаль в точке пересечения траектории фотона с линзой (X_0, Y_0, Z_0) определяется соотношением:

$$\bar{n}_1 = (n_x, n_y, n_z) = \frac{(X_{01} - X_0, -Y_0, -Z_0)}{\sqrt{(X_{01} - X_0)^2 + Y_0^2 + Z_0^2}} \quad (4.15)$$

$$X_{01} = X_0 + \sqrt{R_1^2 - Y_0^2 - Z_0^2}$$

Направление движения фотона меняется с начального l до l' , как:

$$l' = \bar{n}_1 + \frac{l - \bar{n}_1}{n} \quad (4.16)$$

Нормаль ко второй половине линзы определяется, как:

$$\bar{n}_2 = (n_x, n_y, n_z) = \frac{(X_0 - X_{02}, Y_0, Z_0)}{\sqrt{(X_{01} - X_0)^2 + Y_0^2 + Z_0^2}} \quad (4.17)$$

$$X_{02} = X_0 - \sqrt{R_2^2 - Y_0^2 - Z_0^2}$$

Направление движения фотона меняется с l' до l'' :

$$\bar{l}'' = \bar{n}_2 + n(\bar{l}' - \bar{n}_2) \quad (4.18)$$

Координаты точки экрана, в которую попадает фотон (X, Y, Z), равны:

$$t = \frac{X_{scr}}{l''_x}, \quad X = X_0 + Ut, \quad Y = Y_0 + Vt, \quad Z = Z_0 + Wt \quad (4.19)$$

Точность расчётов можно оценить, например, проведя два расчёта (два запуска) с одинаковым числом фотонов, затем найти среднее отклонение результатов по всему полю.

Результаты расчетов

Для апробации разработанной методики были проведены тестовые расчёты переотражения излучения в цилиндрической трубе (стволе гладкоствольного охотничьего ружья) длиной 650 мм и диаметром 18 мм. Внутренняя поверхность ствола хромирована и является хорошим отражателем излучения (света). С одного конца ствол был закрыт белой бумагой, на которую с внешней по отношению к срезу стороны падал свет. На рис. 4.4 приведены результаты расчётов распространения света в цилиндрическом канале с полированной внутренней поверхностью и фотография. Интересно отметить, что система колец получается только в случае присутствия поглощения излучения на стенках ствола ($\varepsilon > 0$). Если $\varepsilon = 0$, тогда системы колец не наблюдается и в результате получается однородный фон. Если считать, что часть излучения отражается от поверхности диффузно, то происходит размывание границ формируемых колец. Как следует из фотографии границы колец достаточно четкие, что свидетельствует об отсутствии (или малости) диффузионной составляющей отраженного излучения. На рис. 4.4 а приведена таблица относительных интенсивностей излучения.

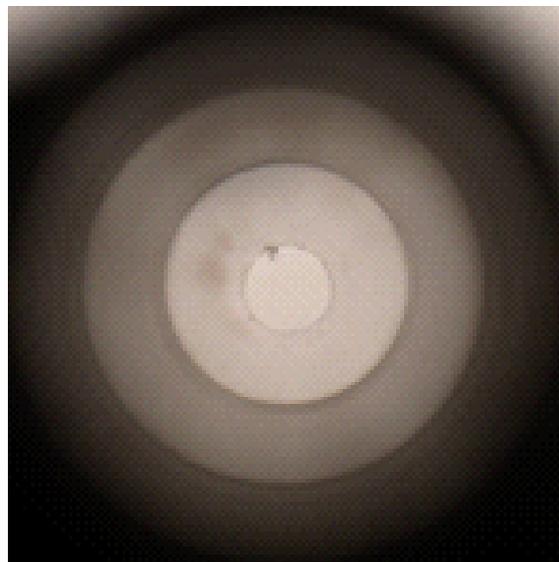
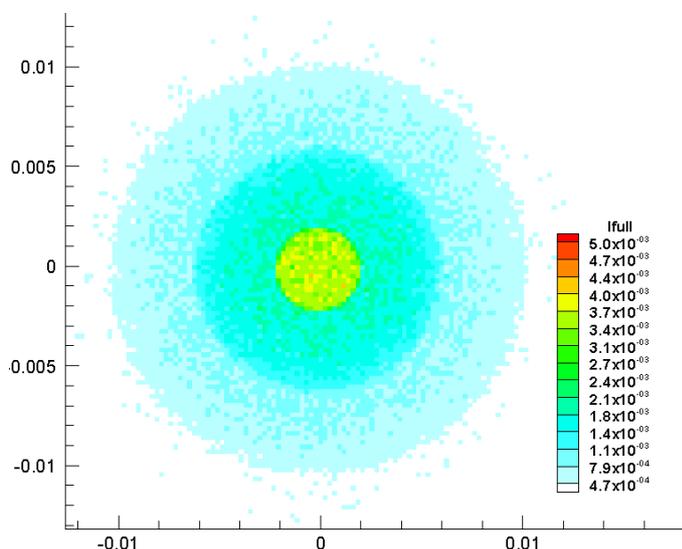


Рис. 4.4 Наблюдаемая картина отраженного излучения в трубе длиной 650 мм и диаметром 18 мм:
а) – расчет, б) – наблюдаемое изображение

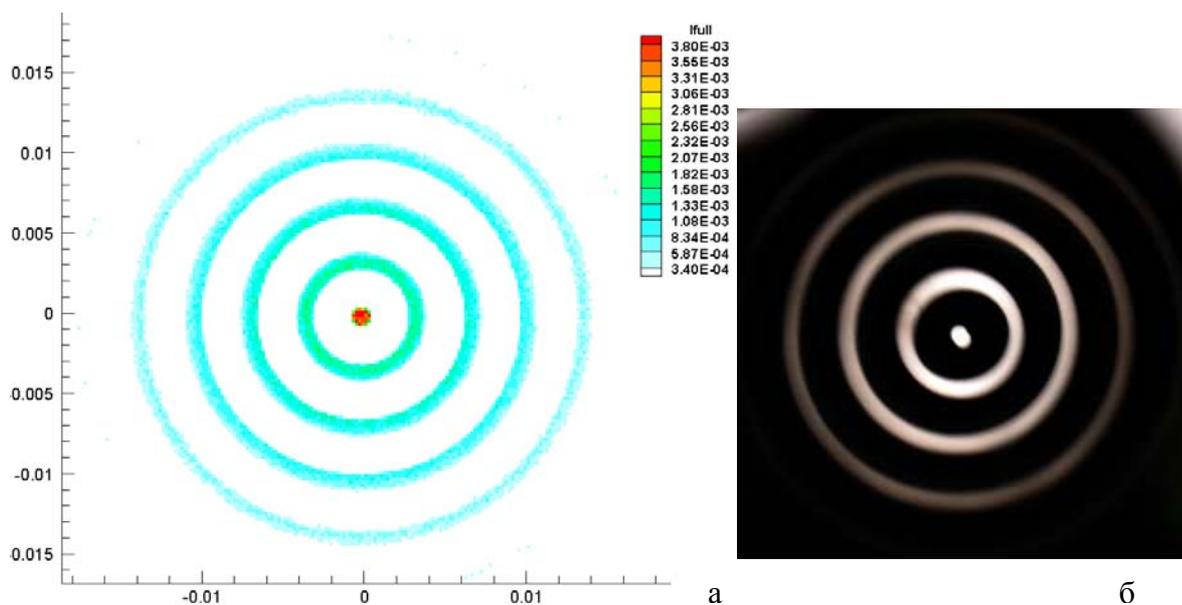


Рис. 4.5 Наблюдаемая картина отраженного излучения в трубе длиной 650 мм и диаметром 18 мм (со стороны среза отверстие диаметром 6 мм): а) – расчет, б) – наблюдаемое изображение

На рис. 4.5 показаны результаты расчетов и фотографии для случаев распространения света в цилиндрическом канале, когда со стороны выхода из ствола в него был вставлена гильза с отверстием под капсюль диаметром 6 мм, а на рис. 4.6, когда источником излучения является квадратное отверстие размера 10×10 мм. Во всех приведенных случаях наблюдается хорошее совпадение рассчитанных картин и фотографий.

Уменьшение интенсивности колец определяется степенью черноты поверхностью ε . Таким образом, данная методика может в принципе быть использована для определения степени черноты поверхностей.

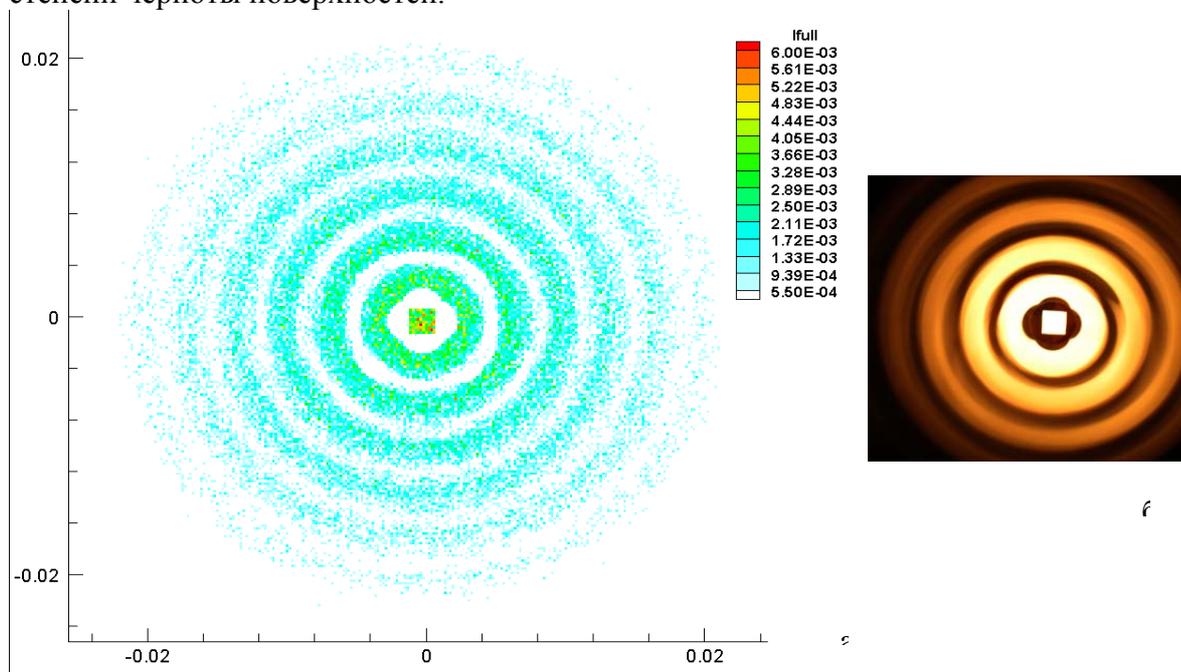


Рис. 4.6 Наблюдаемая картина отраженного излучения в трубе длиной 650 мм и диаметром 18 мм (со стороны среза квадратное отверстие 10×10 мм): а) – расчет, б) – наблюдаемое изображение

Ниже изложенная методика и программа применяются для расчета переотражения излучения нагреваемой в процессе испытаний модели в тракте установки У-13ВЧП. Исследуемый образец (модель) закрепляется в державке на расстоянии 100 – 300 мм от выходного сечения сопла. Диаметр разрядной камеры 180 мм, диаметр критического сечения сопла 60 мм. Модель имеет форму квадрата с размером 150x150 мм. Область, в которой рассматривается процесс отражения фотонов, показана на рис. 4.7.

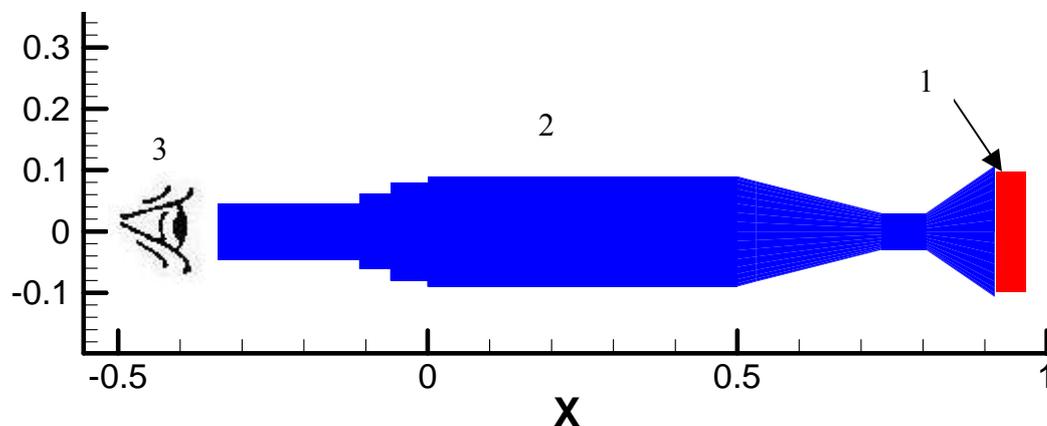


Рис. 4.7 Схематическое изображение рассчитываемой конфигурации:
1 - излучающая модель, 2 - отражающие стенки, 3 - сканирующая термовизионная система

На рис. 4.8 представлены снимки модели термовизионной матричной системой А-40 М. Разрешение 320×240 пикселей, частотный диапазон от 7.5 до 13 мкм. На рисунке 4.8а модель закреплена на расстоянии $L = 210$ мм от среза сопла, на рисунке 4.8б – $L = 110$ мм. На нем присутствует мнимое изображение модели, несмотря на то, что размер модели 150 мм в 2.5 раза больше диаметра выходного сечения сопла, равного 60 мм. После того, как модель была отодвинута на 210 мм от сопла, это изображение пропало (рис. 4.8б). Небольшая несимметричность изображений связана с неточностью установки приемной ИК-камеры по оси плазмотрона.

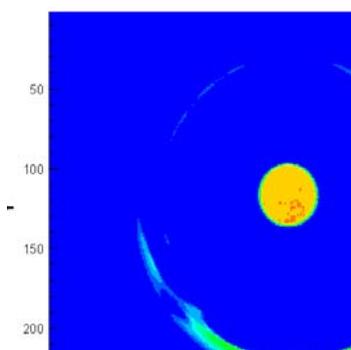


Рис. 4.8 Видеокадры распределения температуры, полученные термовизором А-40 М. Модель находится на расстоянии 210 мм (а) и 110 мм (б) от среза сопла.

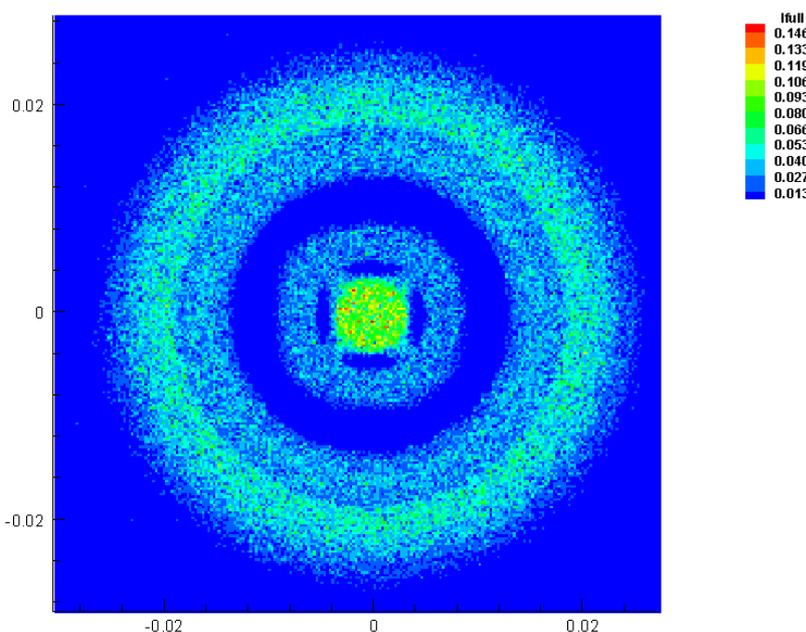


Рис. 4.9 Численное моделирование термовизионного изображения ($L = 110$ мм).

На рис. 4.9 показано расчетное изображение, регистрируемое оптической системой для случая $L = 110$ мм.

На рис. 4.10 приведены прямое (а) и рассеянное (б) изображения по отдельности. Прямое изображение получено от фотонов, летящих непосредственно от источника без отражения от других поверхностей (излучает энергию только модель). Рассеянное изображение формируют фотоны, испытавшие хотя бы одно соударение с другой (не излучающей) поверхностью. Видно, что эти два изображения не перекрывают друг друга. Это следует из законов геометрической оптики. В идеальной оптической системе изображение каждой наблюдаемой точки переходит в единственную точку изображения (на пленке в фотоаппарате или матрице – в термовизионной системе). И, таким образом, переизлучение в тракте установки при отсутствии других нагретых элементов не может быть источником погрешностей измерений температуры оптическими методами.

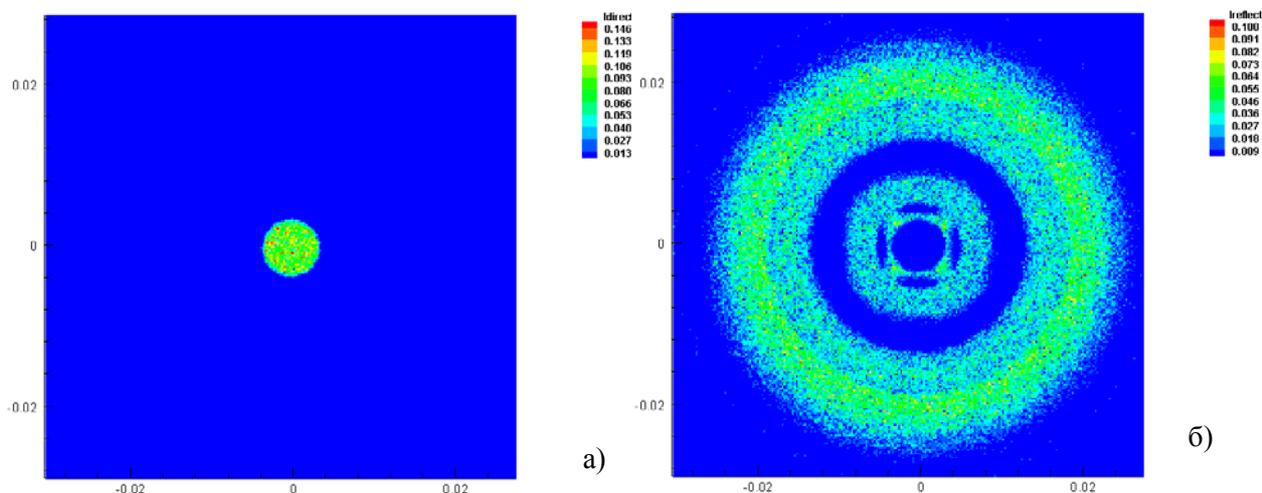


Рис. 4.10 Прямое, не рассеянное изображение (а), рассеянное изображение (б)

Практически все металлические узлы и элементы установки при ее работе охлаждаются водой и не могут нагреваться до высоких температур. Единственным элементом, который

охлаждается только закрученным газовым потоком, является кварцевая разрядная камера. Измерения температуры кварцевой разрядной камеры в процессе работы установки проводились ИК-термовизионной системой AGA-780 на различных режимах работы установки. Интегральная и спектральная излучательные способности кварца хорошо известны, поэтому температура определяется достаточно точно.

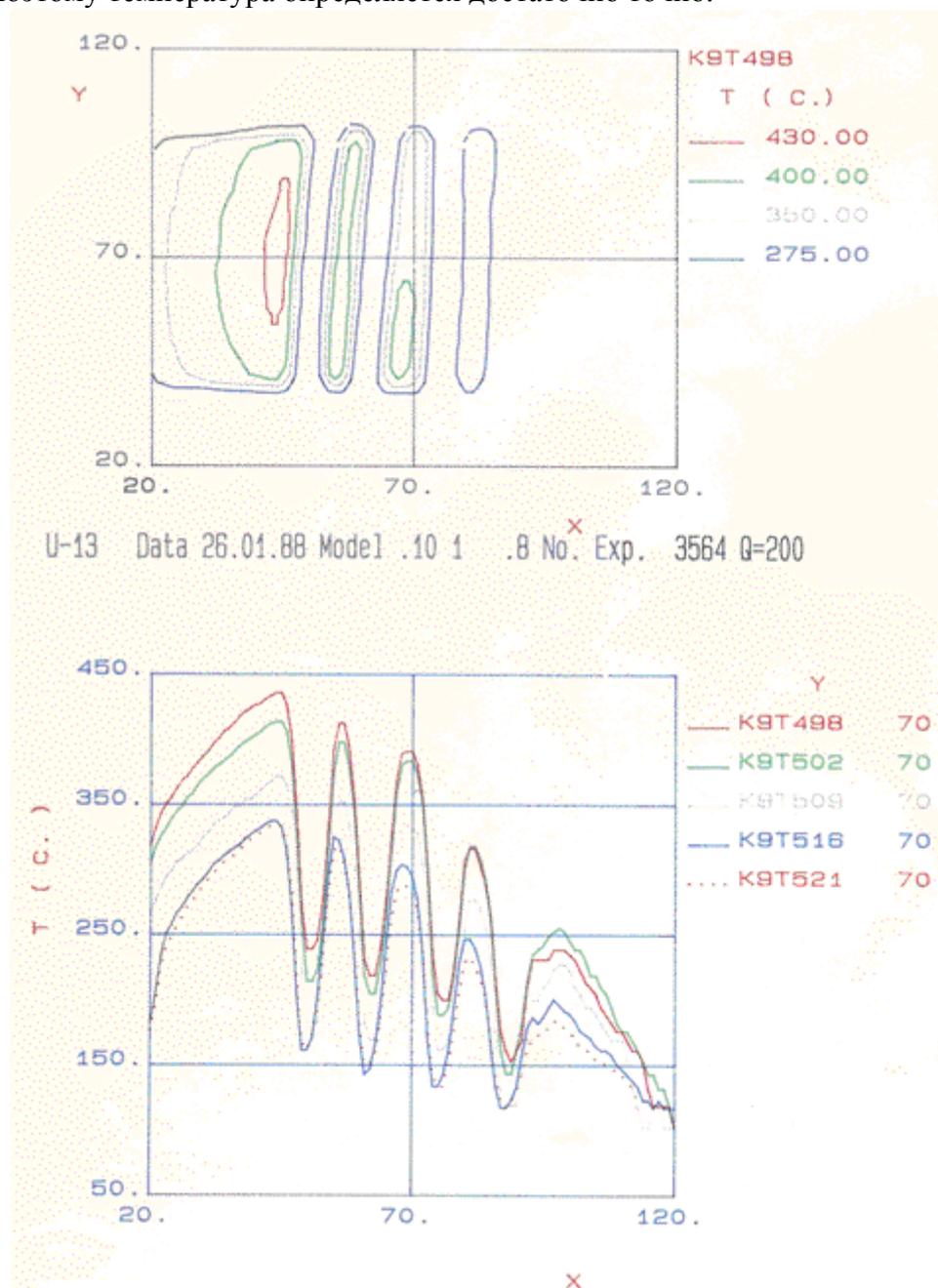


Рис. 4.11 Результаты измерений температуры кварцевой разрядной камеры ($N = 200$ кВт)

На рис. 4.11 показано распределение температур по внешней поверхности разрядной камеры и распределения температуры на центральной образующей при $N = 200$ кВт и различных значениях расхода плазмообразующего газа, измеренные термовизионной системой AGA-780. Немонотонность кривых обусловлена наличием водоохлаждаемого индуктора (4 витка). Из-за малой теплопроводности кварцевого стекла температура внутренней поверхности кварцевой трубки может быть несколько выше. Расчеты переноса излучения решались для конфигурации, приведенной на рис. 4.7 для случая, когда металлические поверхности сопла отражают зеркально, а кварцевая труба излучает и отражает диффузно. Считалось, что металлические части системы подачи потока в

разрядную камеру полностью поглощают излучение. Расчеты показали, что дополнительного нагрева плитки за счет излучения кварцевой трубы не происходит, а интенсивность отраженного от плитки излучения пренебрежимо мала.

Таким образом, на основе метода прямого статистического Монте-Карло разработана методика и создана программа моделирования переноса излучения между площадками в среде оптически прозрачного газа. Эта методика может быть использована при подготовке экспериментальных исследований теплообмена и испытаний ТЗМ в различных высокотемпературных газодинамических установках с целью оптимизации взаимного расположения модели и приемника излучения и выявления факторов, затрудняющих интерпретацию получаемых данных. Проведена оценка влияния рассеянного излучения на точность определения температуры поверхности модели оптическими методами. Показано, что с помощью созданной программы можно из экспериментальных исследований определять степень черноты различных поверхностей.

5. Возможности исследования тепловых режимов возвращаемых космических аппаратов с использованием кристаллических индикаторов максимальных температур

Проблемы контроля тепловых режимов возвращаемых на Землю космических аппаратов относятся к числу наиболее сложных из-за необходимости использования большого числа термодатчиков, трудностей с подводкой необходимых электрических цепей, весовых и компоновочных ограничений на кабельные линии и регистрирующую аппаратуру. Особенно сложно обеспечить температурный контроль элементов теплозащиты, работающих при высоких температурах в условиях воздействия внешних аэродинамических тепловых потоков. Как правило, даже на этапах летной экспериментальной отработки новых космических аппаратов, из-за перечисленных технических трудностей приходится ограничиваться установкой лишь единичных экземпляров термодатчиков.

Одним из путей повышения информативности о тепловом состоянии элементов конструкции и теплозащиты спускаемого аппарата является применение индикаторов максимальных температур, которые позволяют оценить лишь наибольшее значение температуры, достигнутое за все время полета, но при этом не требуют применения какой-либо регистрирующей аппаратуры и соответствующих кабельных коммуникаций на борту спускаемого аппарата.

Наиболее широко применяемыми индикаторами максимальных температур являются термокраски, которые обычно наносятся в виде специальных меток или полосок и необратимо изменяют первоначальный цвет или прозрачность при достижении некоторой температуры (температуры перехода), индивидуальной для данного сорта термокраски. В настоящее время выпускаются термокраски для нескольких десятков значений температур перехода в диапазоне от комнатных температур до 1000°C и даже более. Однако они применяются в основном для теплового контроля внешней поверхности конструктивных элементов, не подвергающихся прямому воздействию интенсивных аэродинамических тепловых потоков. Термокраски плохо переносят механические нагрузки и воздействие влаги в процессе эксплуатации, особенно при посадке аппарата на водную поверхность. Для оценки максимальной температуры в заданной точке поверхности необходимо применение нескольких сортов термокрасок, причем точность измерений помимо точности самих термоиндикаторов существенно зависит от количества красок и размера меток, которые можно нанести в исследуемой зоне с учетом влияния реальных градиентов температуры.

Для контроля максимальных температур технических объектов применяются также специальные плавкие вставки на основе металлических сплавов с хорошо известной и стабильной температурой плавления. Они имеют ряд преимуществ перед термокрасками - более высокая стабильность, малая чувствительность к механическим и коррозионным воздействиям, возможность установки внутри объекта измерения. Вместе с тем, плавкие вставки могут быть изготовлены лишь для ограниченного набора фиксированных температур плавления, а количество вставок, которые могут быть установлены в каждой зоне

измерения, также весьма ограничено из конструктивных соображений. Поэтому при использовании плавких вставок основные проблемы фактической точности измерения максимальных температур остаются теми же, что и для термокрасок.

Одним из эффективных средств регистрации тепловых воздействий являются кристаллические индикаторы максимальных температур (ИМТК), разработанные в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова [31, 32]. В отличие от термокрасок ИМТК обладают большей точностью в области высоких температур, обеспечивают возможность оценки максимальной температуры во всем диапазоне применения с использованием лишь одного датчика, имеют малые габариты и высокую устойчивость к агрессивному воздействию факторов внешней среды.

ИМТК успешно применялись в различных областях машиностроения и энергетики для измерения температур деталей и узлов, работающих в сложных условиях, таких как диски и лопатки турбин, клапаны и поршни двигателей внутреннего сгорания, подшипники и т.п.

В авиакосмической технике возможности применения ИМТК также достаточно перспективны. В частности датчики этого типа широко использовались для оценки уровней внешних тепловых нагрузок на теплозащиту при планирующем спуске с орбиты на Землю при летных испытаниях экспериментальных авиакосмических летательных аппаратов Бор-4 и Бор-5 [33]. В дальнейшем полученная экспериментальная информация была успешно использована при проектировании и летных испытаниях орбитального космического корабля Буран [34].

В настоящее время технология применения ИМТК значительно усовершенствована, и их использование, как в лабораторных, так и в натуральных условиях открывает новые возможности получения ценной информации о тепловом состоянии исследуемых объектов.

Физические принципы действия, конструкция и технические характеристики ИМТК

Метод определения максимальной температуры с помощью ИМТК основан на рентгенодифракционном анализе параметров кристаллической решетки специально подготовленного вещества, которые необратимо меняются в зависимости от достигнутого уровня температуры и продолжительности нагрева.

В качестве таких индикаторных веществ обычно используются кристаллы технического алмаза или карбида кремния кубической модификации (β -SiC), которые предварительно подвергаются действию нейтронного облучения определенной энергии и интенсивности при температуре около 100°C. Под воздействием нейтронного облучения в кристаллах возникают дефекты кристаллической решетки, проявляющиеся в смещении атомов относительно их исходных позиций. При этом происходит общее расширение кристаллической решетки (на 3-4%), которое с высокой точностью может быть измерено методами рентгеновского дифракционного анализа.

Как алмаз, так и кристаллы карбида кремния после нейтронного облучения не имеют остаточной радиоактивности, поэтому не требуется применения каких либо мер радиационной безопасности.

Под воздействием высоких температур (более 1000°C) в кристаллах происходит так называемый отжиг дефектов - атомы постепенно возвращаются на места своих устойчивых положений в узлах кристаллической решетки. Этот процесс происходит тем быстрее, чем выше температура и чем дольше продолжительность нагрева. В результате происходит постепенное восстановление исходных параметров кристаллической решетки, то есть снятие расширения, наведенного облучением.

Количественный анализ степени восстановления кристаллической решетки индикатора проводится методами рентгенодифракционного анализа путем сравнения углов дифракционного отражения рентгеновского излучения на атомах индикаторного вещества до и после нагрева.

Для определения значений максимальных температур, достигнутых в процессе тепловых испытаний, используются специальные градуировочные зависимости,

предварительно полученные при различных уровнях температур и различной продолжительности нагрева для аналогичных индикаторов в лабораторных условиях.

В первом приближении величина изменения угла дифракционного отражения линейно зависит от температуры и логарифмически от продолжительности нагрева. Поэтому для определения максимальных значений температур необходимо знать историю нагрева. В частности, если нагрев происходит при постоянной температуре, необходимо знать только время нагрева. Если же температура в точке измерения меняется в процессе эксперимента, то для определения максимальных значений температур необходимо знать хотя бы в безразмерном виде зависимость изменения температуры от реального времени эксперимента. С одной стороны это является определенным ограничением метода, однако, во многих случаях характер изменения температуры по времени известен или может быть достаточно точно получен расчетным путем. Во всяком случае, применение ИМТК существенно расширяет возможности существующих методов тепловой диагностики.



Рис. 5.1 Кристаллический элемент ИМТК из материала SiC на фоне масштабной сетки 1x1 мм.

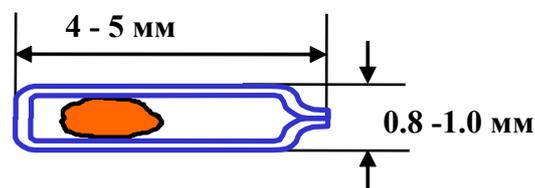


Рис. 5.2 Схема установки элемента ИМТК в контейнер из нержавеющей стали.

Конструктивное исполнение ИМТК зависит от области их применения. Сам кристаллический элемент обычно имеет достаточно малые размеры – от 0.05 до 0.4 мм (рис. 5.1).

Поэтому он легко может быть утерян либо в процессе установки на объект, либо во время тепловых испытаний, или же при последующем извлечении кристалла для рентгеновского анализа. Поэтому безоболочечные ИМТК обычно используются только в технически обоснованных случаях.

Для более простых схем измерений используются кристаллические элементы, помещенные в малогабаритные контейнеры. В качестве одного из таких контейнеров применяется тонкостенная капсула из нержавеющей стали диаметром 1 мм и длиной около 5 мм (рис. 5.2). Возможно также использование контейнеров из керамики и других подходящих материалов.

Технические характеристики ИМТК на основе карбида кремния характеризуются следующими данными:

- диапазон измеряемых температур от 150°C до 1450°C,
- диапазон продолжительности действия измеряемой температуры от 30 секунд до 10 суток,
- стандартная погрешность измерения во всем диапазоне температур, если время измерения известно с точностью $\pm 15\%$:

стационарный режим	$\pm 6^\circ\text{C}$
переменный режим	$\pm 12^\circ\text{C}$
- скорость нагрева ИМТК не более 200 °C/с.

- Реальная точность измерения максимальных температур, как правило, выше и в отдельных случаях достигает $2 - 4^\circ\text{C}$.
- К трудно контролируемым источникам погрешности измерения максимальных температур с помощью датчиков ИМТК относятся:
- изменение условий теплообмена в случае выступления датчиков над уровнем поверхности испытуемого образца;
- изменение теплового потока и температуры, связанное с изменением каталитичности поверхности в месте расположения датчика.

Применение ИМТК в условиях тепловых испытаний на ВЧ плазмотроне

Отработанная технология испытаний теплозащитных материалов в потоке ВЧ-плазмотрона предусматривает применение державок для образцов различных форм и измерения температур внешней (обращенной к потоку) и внутренней поверхностей образца оптическим методом и с помощью термопары соответственно. В потоке ВЧ-плазмотрона в широком диапазоне давлений и температур поверхности ТЗМ воспроизводятся условия натурального полета ГЛА планирующего спуска [9, 35, 36]. Одновременные измерения температуры с помощью термопар и оптическими средствами, дают необходимые зависимости изменения ее от времени испытаний, что существенно повышает точность определения максимальной температуры кристаллическими датчиками. Поэтому результаты отработки датчиков ИПМК в ВЧ-плазмотроне могут быть с большой степенью достоверности перенесены на натурные условия полета. Кроме того, дополнительные измерения температуры датчиками ИПМК могут использоваться как средство взаимного контроля используемых измерительных средств при проведении испытаний ТЗМ.

Отработка датчиков ИПМК на ВЧ-плазмотроне проводилась с использованием державок для образцов двух конфигураций. Первая (рис. 5.3) представляла собой медную охлаждаемую державку, в которой образцы имели размеры 75×75 мм и помещались в обойму из теплоизоляционного материала ТЗМК-10 (плиточная теплозащита).

На этой державке при значениях вкладываемой в разряд мощности $N = 70 - 300$ кВт для дозвуковой рабочей струи реализуются тепловые потоки к образцам в диапазоне $q_{Cu} \sim 250 - 500$ кВт/м² (к высококаталитической медной поверхности, рабочий газ – воздух) при $P = 1000$ Па и несколько большие при увеличении давления ($q_{Cu} = 700$ кВт/м² при $P = 3000$ Па и мощности $N = 300$ кВт). Соответствующие равновесные температуры при $\varepsilon = 0.9$ составляют $T_{wr} = 1400 - 1900$ К. Поскольку реальные ТЗМ имеют конечную каталитичность поверхности K_w , реализующаяся на их поверхности температура может быть существенно ниже.

Для получения более высоких значений тепловых потоков q_{Cu} и температур поверхности образцов используется державка диаметром 50 мм (имеющая форму "евромодели", рис. 5.4). В такую державку, выполненную из силицированного графита, устанавливаются образцы диаметром 25 мм и толщиной 3 – 4 мм. Диапазон реализуемых на такой державке тепловых потоков к образцам (в сопле с выходным диаметром 180 мм) составляет $q_{Cu} = 600 - 1400$ кВт/м², а равновесных температур поверхности $T_{wr} = 1850 - 2250$ К (при $\varepsilon = 0.9$).

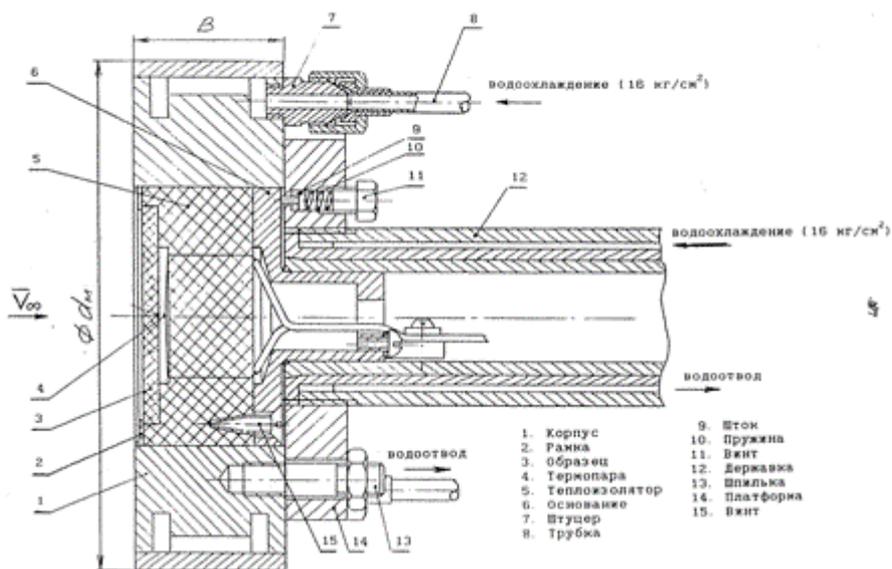


Рис. 5.3 Медная охлаждаемая державка для крепления образцов ТЗМ

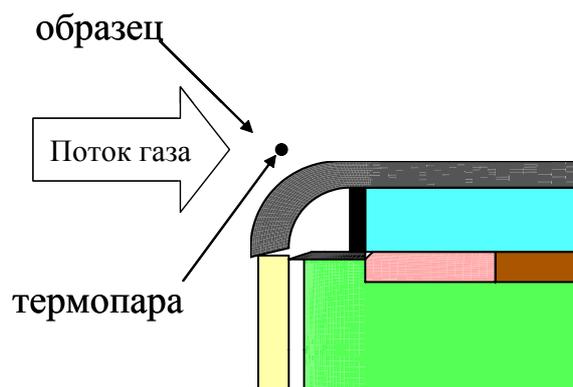


Рис. 5.4 Схема установки образца в державку при испытаниях на ВЧ плазматроне

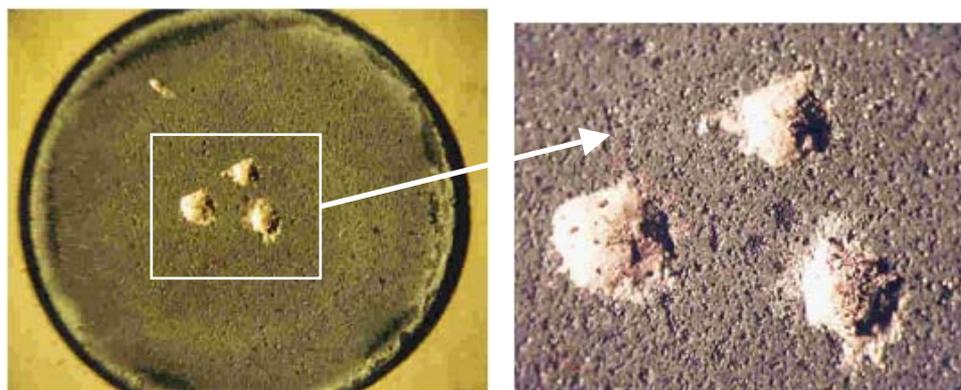


Рис. 5.5 Элементы ИМТК, наклеенные на внешнюю поверхность образца

Измерения максимальных температур с целью отработки технологии установки датчиков ИМТК и сравнения результатов с данными термопарных и оптических измерений проводились с использованием медной державки на образцах материала ТЗМК-10 с покрытием, а с использованием державки меньшего размера на материале C-SiC. В первом

случае образцы испытываемого материала имеют форму прямоугольников 75×60 мм, а во втором – плоских дисков толщиной 4 мм и диаметром 25 мм.

На образцах материала C-SiC элементы ИМТК устанавливались на внешней и внутренней поверхностях испытываемого образца с использованием высокотемпературного цемента на основе алюмохромофосфатного связующего (рис. 5.5).

В потоке ВЧ-плазмотрона на стандартных режимах испытаний был проведен ряд экспериментов, результаты которых приведены в таблице 5.1 и на рисунках 5.6-5.11. В таблице приведены следующие данные: порядковый номер; номер эксперимента; материал образца и покрытие; поверхность образца (внешняя или внутренняя), на которой был приклеен датчик; номер датчика; время испытаний в секундах; максимальная температура, полученная в результате расшифровки; средняя температура, определенная разными датчиками, и разность показаний датчиков ΔT ; разность температур внешней и внутренней сторон образца ΔT_1 .

Из данных, приведенных в таблице, можно заключить, что:

- на внешней (W) поверхности образцов разброс температур больше, чем на внутренней (B), возможно, из-за выступания кристаллов в поток плазмы;
- на некоторых кристаллах получены сомнительные данные (в таблице соответствующие клетки затемнены): 1-B-1 (замер на малом осколке кристалла, который при повторном замере утерян), 1-B-2 (слишком большая температура, возможно выступание кристалла в поток), 2-W-1, 2-W-2 (в образце №2 все кристаллы наклеены на внешнюю поверхность покрытия), 6-W-2 (довольно большой кристалл, сильное выступание в поток);
- для образцов ТЗМК №3 и №8 разброс меньше, т.к. кристаллы были заглублены в толщу покрытия.
- на одном и том же режиме испытаний для образцов ТЗМК №3 (воздух) и №8 (азот) разность температур внешних поверхностей 63°C.
- для образцов карбида кремния Т-1 №4 (воздух) и Т-2 №7 (азот) разность температур внешних поверхностей – 35°C, внутренних поверхностей – 23°C;
- на воздухе максимальные температуры внутренних поверхностей с различными покрытиями в порядке убывания: М46-1 (1291°C), НfВ-1 (1204°C), Т-1 (1195°C).

Таблица 5.1

Результаты испытаний образцов с датчиками максимальных температур

№	Эксп-т №	Образец	Поверхность	ИМТК №	Время, с	Температура, °С	Средняя температура °С	$T_w - T_b$ °С
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1775	Образец Т-1 SiC воздух	Внутр.	1-B-1	300	1140	1228 $\Delta T=177$	
	1-B-2			1317				
2	1796	Образец ТЗМК-1, воздух	Внешн.	2-W-1	330	1423	1361 $\Delta T=131$	
	2-W-2			1367				
	2-W-3			1292				

№	Эксп-т №	Образец	Поверхность	ИМТК №	Время, с	Температура, °С	Средняя температура °С	$T_w - T_b$ °С
3	1797	Образец ТЗМК-2, воздух	Внешн.	3-W-1	300	1264	1261 $\Delta T=7$	
				3-W-2		1257		
4	1798	Образец Т-1 SiC, воздух	Внешн.	4-W-1	264	1251	1231 $\Delta T=41$	$\Delta T_1=36$
				4-W-2		1210		
			Внутр.	4-B-1		1196	1195 $\Delta T=12$	
				4-B-2		1200		
				4-B-3		1188		
5	1799	Образец М46-1, воздух	Внешн.	5-W-1 ½	300	1323	1317 $\Delta T=12$	$\Delta T_1=26$
				5-W-2 ½		1311		
			Внутр.	5-B-1		1289	1291 $\Delta T=3$	
				5-B-2		1292		
6	1800	Образец HfB-1, воздух	Внешн.	6-W-1	258	1230	1225 $\Delta T=73$	$\Delta T_1=21$
				6-W-2		1292		
				6-W-3		1219		
			Внутр.	6-B-1		1197	1204 $\Delta T=13$	
				6-B-2		1210		
7	1801	Образец Т-2 SiC, азот	Внешн.	7-W-1	282	1181	1196 $\Delta T=31$	$\Delta T_1=24$
				7-W-2		1195		
				7-W-3		1212		
			Внутр.	7-B-1		1173	1172 $\Delta T=2$	
				7-B-2		1171		
8	1802	Образец ТЗМК-3, азот	Внешн.	8-W-1	318	1196	1198 $\Delta T=4$	
				8-W-2		1200		

На левой шкале рис. 5.6 – 5.11 показаны кривые изменения температуры наружной и внутренней поверхностей образца, измеряемые пирометром и термопарой (T_{PYR} и T_{TC} соответственно) от времени. На правой шкале показано изменение давления на модели во время эксперимента. Отрезками прямых показаны максимальные значения температур (T_B – внутренняя поверхность, T_w – внешняя поверхность), полученные с помощью кристаллических датчиков.

Анализ данных, приведенных на рисунках, а также и других экспериментах этой серии, показывает, что показания кристаллических датчиков, за исключением отдельных случаев,

удовлетворительно согласуются с показаниями термопары. Тогда как значения температур, измеренных оптическими средствами (пирометр или термовизионная система AGA-780) с $\epsilon_\lambda = 0.8$, как правило, существенно выше.

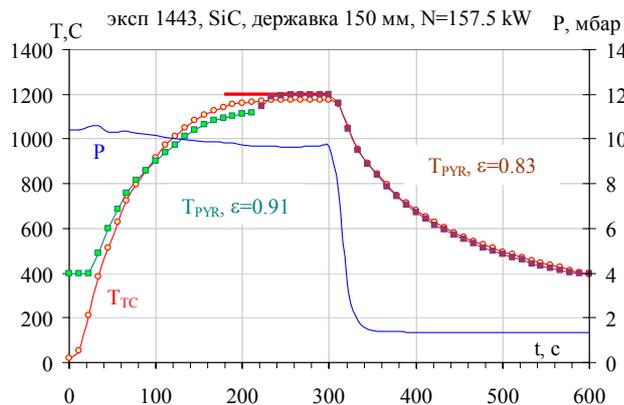


Рис. 5.6

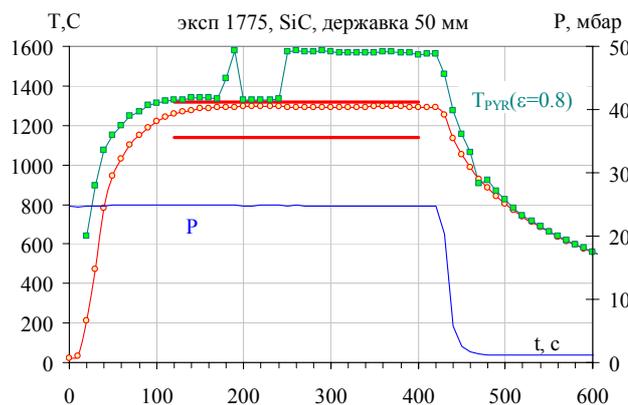


Рис. 5.7

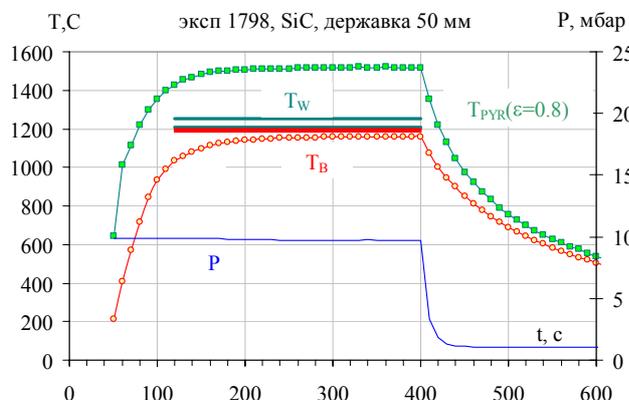


Рис. 5.8

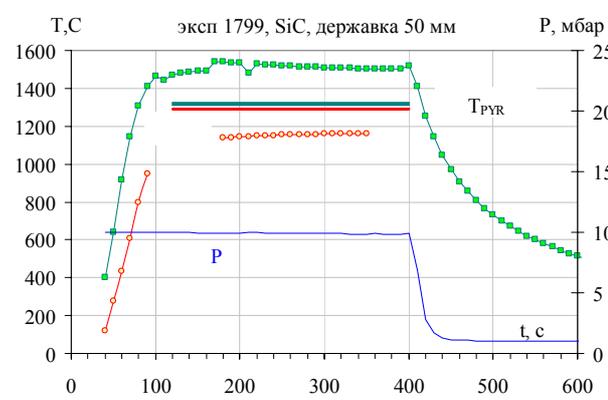


Рис. 5.9

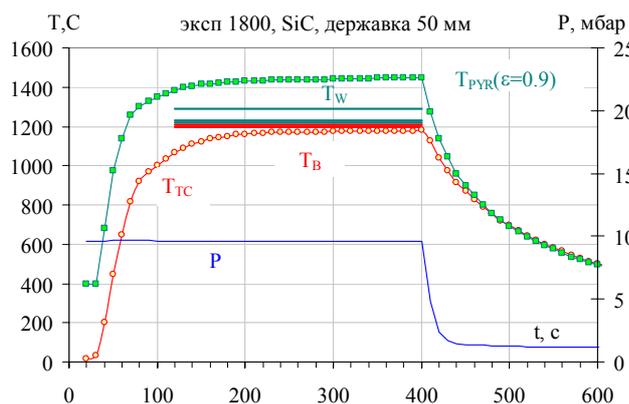


Рис. 5.10

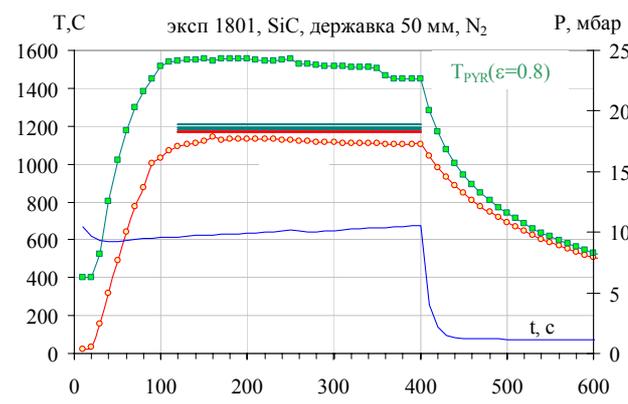


Рис. 5.11

Скачкообразное изменение температуры T_{PYR} на рис. 5.6 и 5.7 обусловлено изменением значения спектральной степени черноты, устанавливаемой на пирометре, в процессе эксперимента. Такая сильная зависимость температуры поверхности от ϵ_λ подчеркивает необходимость её тщательного измерения.

Разница в показаниях кристаллов, расположенных рядом на образце в одном эксперименте, связана с технологией их заделки в покрытие (различная степень выступания над уровнем поверхности). Измеренная кристаллическими датчиками разница температур

внешней и внутренней поверхностей образцов (экс №1798-1801) составляет $\Delta T_1 = 21\text{--}36^\circ\text{C}$. Это хорошо согласуется с расчетным значением. На рис. 5.12 приведены расчетные значения $dT = T_w - T_{TC}$ и величины теплового потока, поступающего внутрь образца q_l , в зависимости от T_w , полученные по методике [10].

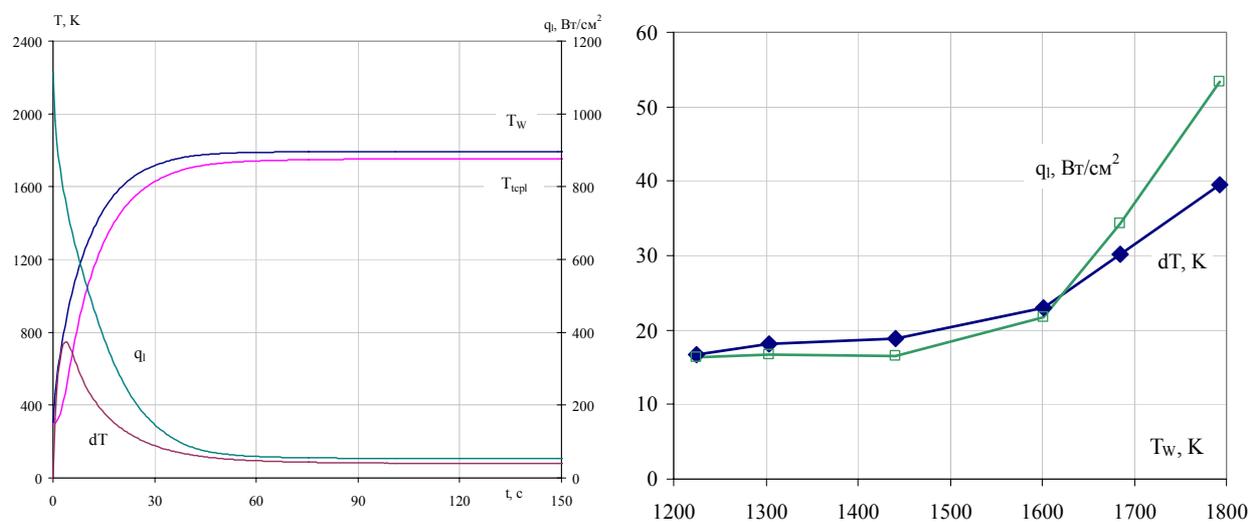


Рис. 5.12 Расчетные значения утечек тепла q_l и перепада температур между внешней поверхностью и точкой расположения термопары dT
а)– зависимость от времени испытаний, б)–зависимость от температуры поверхности на квазистационарном режиме теплообмена

Представленные данные иллюстрируют практическую возможность применения ИМТК для анализа температурных режимов испытываемых элементов тепловой защиты возвращаемых космических аппаратов.

Выводы

В целом, из проведенных исследований, направленных на объяснение расхождения значений температур поверхности образцов ТЗМ в плазменном потоке измеряемых различными методами, можно заключить:

1. При выборе датчиковых средств измерений (например, датчиков для измерения температур или тепловых потоков), находящихся в контакте с плазмой и в летных условиях и в высокотемпературных установках (дуговых или ВЧ-плазмотронах) следует иметь в виду возможность возникновения дополнительных погрешностей, связанных с влиянием каталитичности поверхности материала датчика на теплообмен. Некоторые виды измерений, например, термопарные измерения обшивки корпуса под слоем тепловой защиты можно проводить стандартными датчиками. Выбор датчиков должен сопровождаться их всесторонними испытаниями в условиях, близких к натурным по основным параметрам.

2. Всесторонние экспериментальные исследования влияния воздействия плазменного потока, внешних и наведенных в плазме электромагнитных полей, статического электрического заряда, возможными утечками тепла, и других факторов на погрешности термопарных измерений температуры внешней поверхности плиточной теплозащиты (материал ТЗМК-10), проведенные в потоке ВЧ-плазмотрона, показали, что большинство перечисленных факторов или не проявляются, или могут быть устранены.

3. Прямыми измерениями инфракрасным пирометром температуры поверхности образца карбида кремния (SiC) нагреваемого потоком плазмы, установлено, что при неопределенности в значениях спектральной степени черноты ε_λ в диапазоне 0.8 – 0.95, погрешность измерения температуры превышают 200°C при уровне $T_w = 1800 \text{ K}$.

4. Исследованы возможные погрешности оптических измерений температуры поверхности образцов ТЗМ при их испытаниях в ВЧ-плазмотроне, связанные с влиянием

следующих факторов: недостаточно точным знанием степени черноты материала в заданном интервале длин волн и высоких температурах; возможным свечением газа в спектральной области пирометра; наличием фонового излучения нагретых элементов установки; образованием на поверхности образца, помещенного в поток плазмы, электронно- и колебательно-возбужденных молекул, излучающих в спектральном интервале пирометра.

5. На основе решения задачи о переносе излучения в тракте установки с ВЧ-плазмотроном методом прямого статистического метода Монте-Карло установлено, что отражение излучения от различных элементов установки (переизлучение) и наличие дополнительных источников излучения, таких как кварцевая разрядная камера, не вносит дополнительной погрешности в определение температуры поверхности испытуемых образцов ТЗМ оптическими средствами.

6. Путем непосредственных измерений интенсивности излучения в ИК-области спектра в окрестности модели, обтекаемой плазменным потоком, установлено, что наиболее вероятной причиной различия измеряемых значений T_w различными методами является присутствие в окрестности модели источников излучения в инфракрасной области спектра.

7. С целью обеспечения контроля температур элементов теплозащиты, работающих при высоких температурах в условиях воздействия высоких тепловых потоков, наряду с традиционными средствами измерений рекомендуется использовать кристаллические индикаторы максимальных температур. Эти датчики позволяют определить наибольшее значение температуры, достигнутое за все время полета, но при этом не требуют применения какой-либо регистрирующей аппаратуры и соответствующих кабельных коммуникаций на борту спускаемого аппарата. Отработка датчиков, проведенная в ВЧ-плазмотроне в условиях, близких к натурным, показала их работоспособность и достаточно хорошее согласие их показаний с данными термодинамических измерений.

8. Расчеты обтекания, прогрева и теплового состояния образца ТЗМ в державке, имеющей форму "евромодели", показывают, что различие температур внешней поверхности и ее значения в точке установки термопары при достаточно больших временах испытаний ($t > 200$ с) не может превышать $15 - 20^\circ\text{C}$.

Литература

1. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. М.: Из-во "Мир". 1988.– 416 с.
2. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. М.: Из-во "Мир". 1975.–934 с.
3. Спэрроу Э.М., Сесс Р.Д. Теплообмен излучением. Л.: Энергия, 1971, 295с.
4. Датчики теплофизических и механических параметров. Справочник в трех томах. Под ред. Ю.Н. Коптева. Т.1. – М.: ИПРЖР, Москва. 1998, 458 с.
5. Витглеб Г. Датчики. Пер. с англ.– М.: Мир, 1989.
6. Осипович Л. Датчики физических величин. – М.: Машиностроение, 1979.
7. Како Н., Ямаке Я. Датчики и микро- ЭВМ.– Л.: Энергоиздат, 1989.
8. Датчики теплотехнических и механических величин. Справочник / А.Ю. Кузин, П.П. Мальцев и др. – М.: Энергоатомиздат, 1996.
9. Залогин Г.Н., Землянский Б.А., Кнотько В.Б., Мурзинов И.Н., Румынский А.Н., Кузмин Л.А. Высокочастотный плазмоторон - установка для исследований аэрофизических проблем с использованием высокоэнтальпийных газовых потоков // Космонавтика и ракетостроение, 1994, № 2, с. 22-32.
10. Власов В.И., Ковалев Р.В., Кусов А.Л. Расчет теплового режима державки для образцов испытуемых материалов с целью оптимизации формы устройства и применяемых для его изготовления высокотемпературных материалов. – Космонавтика и ракетостроение, 2004, № 3(36), с. 62-69.
11. Гофин М.Я. Жаростойкие и теплозащитные конструкции многоразовых аэрокосмических аппаратов. Москва. 2003. С. 671.

12. Stewart D.A., Rakich J.V., Lanfranco M.J. Catalytic surface effects experiments on Space Shuttle // AIAA Paper, 1981, N 1143, p. 15.
13. Rakich J.V., Stewart D.A., Lanfranco M.J. Results of a flight experiment of the catalytic efficiency of the Space Shuttle heat shield // AIAA Paper, 1984, N 944, p. 14.
14. Zoby E.V., Gupta R.N., Simmonds A.L. Temperature dependent reaction-rate expression for oxygen recombination at Shuttle entry conditions // AIAA Paper, 1984, N 224, p.8.
15. Shim J.L., Moss J.N., Simmonds A.L. Viscous shock layer heating analysis for the Shuttle windward symmetry plane with surface finite catalytic recombination rates // Entry vehicle, heating and thermal protection systems. V. 85, 1983.
16. Воинов Л.П., Залогин Г.Н., Лунев В.В., Тимошенко В.П. Сравнительный анализ лабораторных и натуральных данных о каталитичности материалов теплозащиты ЛА "Бор" и "Буран". // Космонавтика и ракетостроение, 1994, № 2, с.51-57.
17. Беспалов В.Л., Воронкин В.Г. К теории каталитического калориметра // Изв. АН СССР, МЖГ, 1980, № 1, с. 192-195.
18. Баронец П.Н., Колесников А.Ф., Кубарев С.Н., Першин И.С., Труханов А.С., Якушин М.И. Сверхравновесный нагрев поверхности теплозащитной плитки в дозвуковой струе диссоциированного воздуха // Изв. АН СССР, МЖГ. 1991, № 3, с. 144-150.
19. Власов В.И., Горшков А.Б., Землянский Б.А. и др. Численное моделирование теплообмена при входе в атмосферу Земли спускаемых аппаратов типа "Клипер"//Космонавтика и ракетостроение, 2007, № 1(46), с. 30-37.
20. Беннет Р.Л., Рейни У.Т., Мак-Клейн У.М. Изучение нестабильности хромель-алюмелевых термопар в атмосфере гелия. В кн.: Измерения температур в объектах новой техники. Мир. М. 1965.
21. Каменщиков В.А., Пластинин Ю.А., Николаев В.М., Новицкий Л.А. Радиационные свойства газов при высоких температурах. М.: Машиностроение. 1971, с.440.
22. Knotko V.B., Osipov V.A., Rumynsky A.N., Zalogin G.N., Zemliansky B.A. Experimental Study of Different Thermal Protection Materials in Dissociated Carbon Dioxide Flow. Proceedings of the Third European Symposium on Aerothermodynamics for Space Vehicles. ESTEC, Noordwijk, 1998.
23. Халперн Б., Рознер Д.Э. Неполная аккомодация энергии в реакциях на каталитических поверхностях. В сб.: Гетерогенная химия атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986, с. 306-318.
24. Melin G.A., Madix R.J. Energy accommodation During Oxygen Atom Recombination on Metal Surface // Trans. Far. Soc., 1971, v.67, N 1, pp. 198-211.
25. Беркут В.Д., Дорошенко В.М., Ковтун В.В., Кудрявцев Н.Н. Неравновесные физико-химические процессы в гиперзвуковой аэродинамике. М.: Энергоатомиздат, 1994. 399 с.
26. Гаррет Х.Б., Чатджан А., Гэбриел С.Б. Свечение над поверхностью КЛА и его влияние на работу бортовых систем // Аэро/космическая техника, № 10, 1989, с. 64-90.
27. Залогин Г.Н., Зуев А.П., Кнотько В.Б. Моделирование приповерхностного свечения газа в высокочастотном плазмотроне// Космонавтика и ракетостроение, 1997, № 11, с. 94-100.
28. Knotko V.B., Rumynsky A.N., Tkachenko V.K., Zuev A.P. OMA Spectroscopic Monitoring of Plasma Parameters in 1000 kW High Frequency Plasmotron Applications. 11 th European Congress on Thermal Plasma Processes. Paris. 1993.
29. Бай Ши-и. Динамика излучающего газа. М.: Мир, 1968, 324с.
30. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. М.: Наука, 1973, 312с.
31. Карпухин В.И., Николаенко В.А. Измерение температуры с помощью облученного алмаза. Москва, Атомиздат, 1971.
32. Николаенко В.А., Морозов В.А. Разработка и опыт использования измерителя максимальной температуры кристаллического. Москва, Атомиздат, 1979.
33. V. Timoshenko, G. Lozino-Lozinsky, Lessons Learned from the BOR Flight Campaign, Proceedings of the Third European Symposium on Aerothermodynamics for Space Vehicles, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, ESA SP-426, 1998.

34. V. Timoshenko Buran main thermal protection components, Proceedings of the First ESA/ESTEC Workshop on Thermal Protection Systems, Noordwijk, The Netherlands, ESA-WPP-053, 1993.
35. Колесников А.Ф. Условия моделирования в дозвуковых течениях теплопередачи от высокоэнтальпийного потока к критической точке затупленного тела // Изв. РАН, МЖГ. 1993, № 1, с. 172-180.
36. Власов В. И., Залогин Г. Н., Землянский Б. А., Кнотько В. Б., О моделировании натуральных условий при отработке в высокочастотном плазмотроне материалов для теплозащиты гиперзвуковых летательных аппаратов, Космонавтика и ракетостроение, 2001, № 23. С. 85-93.

Статья поступила в редакцию 7 августа 2008 г.