

## СПЕКТРАЛЬНО-ТОМОГРАФИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ В ДВС

О.В. Филонин

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Важнейшими характеристиками, определяющими эффективность горения рабочей смеси в камерах сгорания ДВС являются: характер заполнения камеры рабочей смесью, с учетом ее турбулизации и гомогенности в элементарных объемах, процесс воспламенения и пространственная «газодинамика» фронта горения, динамика процесса горения в объеме камеры, при изменении ее объема и термодинамических параметров. Детальный анализ этих характеристик позволяет оптимизировать процессы работы двигателя, увеличить его мощность, снизить расход топлива и т.д. К сожалению, существующий в настоящее время уровень технического развития не позволяет в полной мере получать все искомые и необходимые параметры процессов горения топлива, непосредственно в камерах сгорания. Определенный, положительный вклад в исследование процессов горения в замкнутых объемах, в том числе в камерах сгорания ДВС, РД и пр. внесла спектрально-томографическая диагностика процессов воспламенения и горения топлив [1]. Этот подход позволяет реконструировать пространственное распределение интенсивностей, температур, концентраций капельной (жидкой) фазы, сажистых – углеродных частиц в исследуемых объемах, используя собственное оптическое излучение исследуемого объекта или внешнее зондирующее излучение.

Для решения подобного рода задач автором разработана малоракурсная спектрально-томографическая система диагностики параметров горения в камерах сгорания ДВС. Ее оптическая и структурная схемы представлены на рис. 1. Основное назначение систем такого рода является трехмерная реконструкция интенсивностей излучения, функций распределения температур, концентраций частиц в оптическом диапазоне излучения. Достоверная трехмерная информация, например, о функции яркостной температуры дает возможность реконструировать пространственную картину возникновения и распространения фронта горения топлива в камере, определить его скорость распространения и т.д. 3D – информация о распределении частиц углерода говорит о полноте сгорания топлива, что в свою очередь дает возможность оптимизировать форму камеры сгорания и параметры заполнения ее рабочей смесью. Таким образом, разработка новых, высокоэффективных малоракурсных систем диагностики для исследования процессов горения в замкнутых объемах является весьма актуальной задачей.

В зависимости от конструкции ДВС, точнее головки блока цилиндров, предложено несколько способов регистрации исходных двумерных проекционных данных в оптическом диапазоне собственного излучения воспламененной смеси. Наиболее простой с точки зрения технической реализации является геометрия двухракурсной геометрии регистрации исходных данных. Эскиз геометрического расположения входных оптических каналов в головке блока цилиндров для двухклапанного двигателя показан на рис. 1 а). В таких случаях оптические трубки - объективы входных каналов располагаются симметрично по бокам свечи зажигания, таким образом, чтобы их главные оптические оси пересекались в геометрическом центре окружности соответствующей размеру поршня.

Эскиз объектива представлен на рис. 1,б. Для диагностики процессов воспламенения и горения двухфазных смесей в ДВС, по результатам экспериментальных исследований выбран трехлинзовая схема регистрации теневых проекционных изображений [2]. Входная линза выполнена из кварцевого стекла, две другие их оптического стекла. Линзы размещаются в герметичном корпусе, выполненном для удобства монтажа из трех элементов. Назначение третьей линзы заключается в проецировании теневого проекционного изображения на входной торец оптико-волоконного светопровода для передачи изображений. Для стандартного (1,5÷2) литрового двигателя диаметры линз составляют 14 мм, фокусные расстояния линзовых систем объектива (21, 18)мм.

Более сложной, с точки зрения технической реализации, но более эффективной в плане информационной отдачи и достоверности получаемой реконструкции является трехракурсная система регистрации. На рис. 1,в представлена так называемая планарная геометрия регистрации проекционных данных, при которой оптические оси объективов фактически лежат в одной плоскости. Здесь же показаны их реальные «зоны обзора» для каждого объектива, как видно из рисунка, результирующая зона регистрации не в полной мере охватывает исследуемый объем, что требует процедур доопределения данных в процессе ВТ-реконструкции. В зависимости от конструкции головки блока цилиндров, рассмотренная геометрия, не всегда может быть реализована, например, в головках, имеющих 4-клапана на цилиндр. В таких случаях расположение считывающих объективов может быть сведено к геометрии их пространственного расположения показанной на рис. 1,г.

Формирование исходных проекционных данных для задач рассматриваемого типа может осуществляться двумя путями. Для анализа процессов воспламенения и распространения фронта горения в объеме камеры, достаточно зарегистрировать распределение интенсивности собственного излучения в плоскостях проекций, с последующей 3D-реконструкцией конфигурации фронта. Схема такой регистрации представлена на рис. 1,д. От-

личительной особенностью предложенной оптико-электронной схемы регистрации является наличие оптических затворов и микроканальных усилителей яркости, располагаемых непосредственно перед матричным фотоприемником. Это дает возможность синхронно зарегистрировать двумерные проекционные данные за временной интервал порядка  $1 \cdot 10^{-6}$  с, что увеличивает достоверность пространственной реконструкции конфигурации фронта горения. Для анализа динамики процесса его распространения делается несколько последовательных «мгновенных» фиксаций проекционных данных. Их количество и интервалы дискретизации определяются быстродействием матричной фотодетекторной структуры, системы опроса, АЦП, системы буферизации данных и пр. Управление сбором исходных проекционных данных осуществляется с помощью микропроцессорной системы управления, которая в конечном итоге и каждого проекционного изображения формирует пакеты одномерных проекций. Эти одномерные проекции в каждой двумерной выбираются в радиальных направлениях, под одинаковыми полярными углами. Количество формируемых одномерных проекционных данных обычно выбирается в пределах  $(16 \div 24)$ , таким образом, исходное число одномерных проекционных данных составляет  $2 \times (16 \div 24)$ ,  $3 \times (16 \div 24)$ .

Основные математические положения разработанного метода ультра-малоракурсной реконструкции параметров горения двухфазных смесей можно свести к следующему. 3D-реконструкция конфигурации поверхности фронта горения производится путем вычисления трехмерного спектра Фурье следующим образом.

После предварительной дискретизации, фильтрации исходных одномерных проекционных данных, число которых выбирается в пределах  $2 \times (16 \div 24)$ ,  $3 \times (16 \div 24)$ , производится вычисление одномерных спектров Фурье для каждой одномерной проекции. Таким образом, формируется  $2 \times (16 \div 24)$ ,  $3 \times (16 \div 24)$  одномерных Фурье - образов, которые далее в соответствии с теоремой о центральном сечении распределяются в трехмерном пространстве Фурье в дискретной сферической системе координат. Важным моментом здесь является количество отсчетов в каждой одномерной проекции – степень дискретизации. В результате проведенных экспериментальных исследований было установлено, что наиболее оптимальным количеством отсчетов в каждой проекции является 128, для 1,5-, 2х-литровых двигателей, при этом предполагается, что представление искомой функции распределения, для увеличения наглядности, производится в виде 3D-поверхности. Следовательно, формат дискретного «Фурье-шара» имеет диаметр соответствующий 128 отсчетам, таким образом, и исходный размер реконструируемого двумерного изображения составляет  $(128 \times 128)$  элемен-

тов, при этом восстанавливаемый объем определяется дискретным кубом формата (128×128×128) элементов.

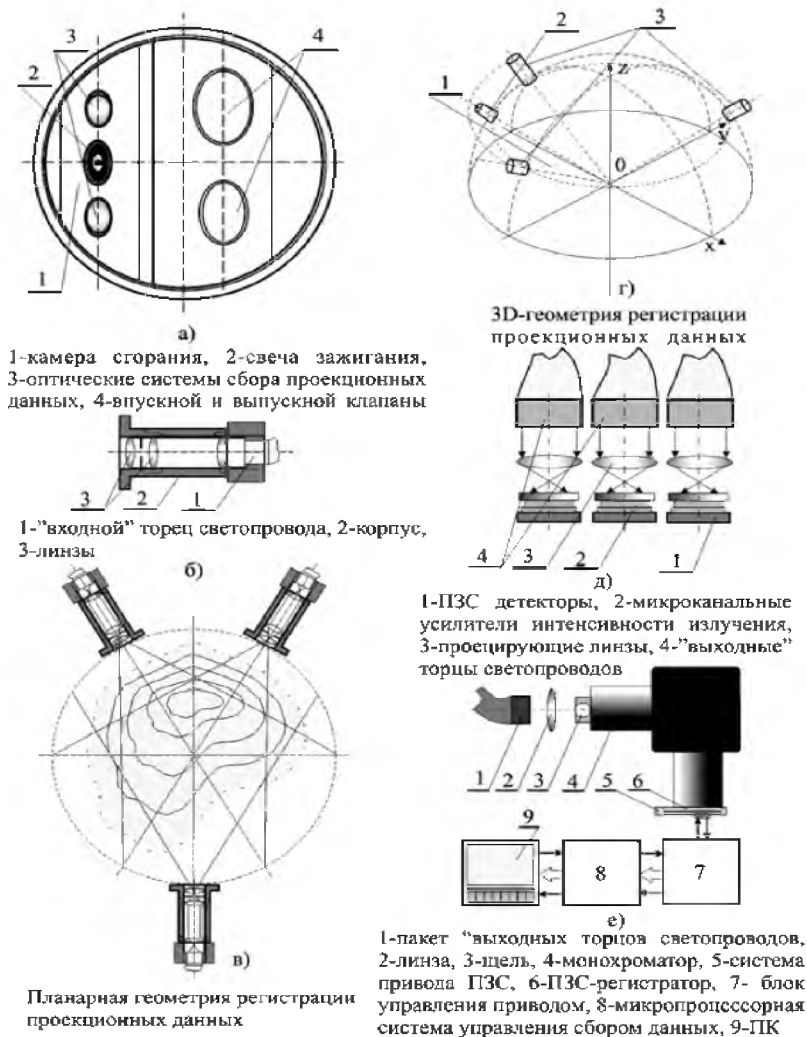


Рис.1. Иллюстрация схем формирования исходных данных и структурная схема их обработки при ультразвуковой ВТ-диагностике ДВС

Набор дискретных диаметров, являющихся Фурье - образами одномерных проекций полностью не определяют 3D-Фурье – образ искомой функции. Следовательно, возникает задача доопределения необходимых, недостающих Фурье – отсчетов. Эта задача решается с использованием методов интерполяции по кольцевым гармоникам, априорных данных и эвристического подхода используемого для 2D-реконструкции, суть которого будет изложена ниже.

После доопределения необходимого числа отсчетов в 3D - пространстве Фурье, там же выбираются пересекающиеся плоскости, под равными углами  $\Delta\theta_i; \Delta\varphi_i$  представляющие собой дискретные круги Фурье – отсчетов. Понятно, что в дискретном варианте указанная выборка представляет собой, строго говоря, не плоскость, а «радиально – плиссированную» поверхность. Для каждой такой поверхности определяются секущие плоскости, на которых вычисляются дискретные Фурье - отсчеты. Каждая такая плоскость, представляющая собой круг, является двумерным Фурье – образом двумерного сечения исследуемого объекта, определяемого в пространстве координат  $(X, Y, Z)$  углами  $\Delta\theta_i; \Delta\varphi_i$ . Таким образом, проведя ряд процедур обратного преобразования Фурье для всех выше указанных, определяемых плоскостей получаем набор 2D-сечений. Далее, с целью увеличения наглядности отображения искомых функций распределения, снижения временных затрат на вычислительные процедуры в каждой 2D – проекции производится выделение изопараметрических контуров, число которых определяется задачей эксперимента. Например, для исследования процессов воспламенения и анализа динамики распространения фронта горения, достаточно выделить по одному контуру. На заключительных этапах производится формирование трехмерного массива соответствующего изопараметрической поверхности и отображение информации в проекционном или объемном виде с помощью алгоритмов проекционного отображения.

Разработанные схемы регистрации исходных проекционных данных, как уже было отмечено, относятся к области ультрамалоракурсной ВТ - диагностики, которая использует эвристические подходы. Для данного класса задач предложен следующий вариант эвристического анализа исходных данных. Искомая функция распределения, например, интенсивности излучения, при анализе динамики распространения фронта горения смеси. В общем случае [3] она может быть записана в виде:

$$I(r, \theta) = \sum_{m=0}^M I_m^0(r) \cos(m\theta_i) + I_m^0(r) \sin(m\theta_i) . \quad (1)$$

Такое представление (1) дает возможность восстанавливать по  $K$  проекциям  $2K$  членов ряда, если проекция определена как хордовый сигнал от искомой функции  $I(r, \theta)$  и удовлетворяет условию Радона. Процессы

воспламенения рабочей смеси в камере сгорания характеризуются сильно неаксиальным распределением интенсивности излучения фронта горения и самой смеси по объему камеры. В силу достаточно высокой турбулентности впрыскиваемой смеси процессы горения характеризуются наличием нескольких периферийных максимумов. Такие распределения не могут быть восстановлены томографическими методами на основе разложения Кормака при малом числе проекций. Для разрешения данной коллизии предложены следующие этапы:

- Так как с развитием процесса горения, происходит воспламенение практически всего объема рабочей смеси, то необходимо предусмотреть процедуру выделения сигнала от фронта горения, который будем считать «возмущением», от «фона», определяемого горением смеси.
- Вычисление координат центров «периферийных возмущений».
- Раздельная УМВТ – реконструкция по проекциям «фона» и «возмущения».
- Синтез результатов реконструкции в одно изображение.

Отдельные этапы реконструкции можно свести к следующему. Для разделения вкладов «фона» и «возмущения» можно например, представить искомую функцию в виде:

$$I(r, \theta) = P_M(r, \theta) + Q_N(|\vec{r} - \vec{r}^i|, \theta), \quad (2)$$

где  $P_M(r, \theta), Q_N(r, \theta)$  полиномы вида:

$$P(r, \theta) = \sum_{m=0}^M P_m^c(r) \cos(m\theta) + P_m^s(r) \sin(m\theta). \quad (3)$$

Здесь  $M, N$  - небольшие целые числа,  $P_m^i(r), Q_m^i(r)$  - гладкие функции определенные на круге единичного радиуса. Исходя из анализа экспериментальных данных, можно считать, что «возмущение», описываемое функцией  $Q_N(|\vec{r} - \vec{r}^i|, \theta)$  достаточно локализовано, так что радиус ее носителя  $r \ll 1$ . Так как две проекции (рис.1 а) дают возможность восстановить четыре коэффициента  $P_m^i(r)$  при отсутствии периферийных «возмущений», то возможность реконструкции «модельной функции» вида:

$$I(r, \theta) = P_0(r) + P_1^s(r) \sin(\theta) + P_2^c(r) \cos(\theta) + Q_0(|\vec{r} - \vec{r}^i|). \quad (4)$$

В таком случае функции проекции можно определить в виде:

$$\begin{cases} F_1(p) = f_0(p) + f_1^c(p) \cos(\varphi_1) + f_1^s(p) \sin(\varphi_1) + q(p - p_1), \\ F_2(p) = f_0(p) + f_2^c(p) \cos(\varphi_2) + f_2^s(p) \sin(\varphi_2) + q(p - p_2). \end{cases} \quad (5)$$

В приближении ортогонального проецирования для направлений  $\varphi_1 + \pi, \varphi_2 + \pi$ , можно записать еще одну систему уравнений в виде:

$$\begin{cases} F_1(-p) = f_0(p) - f_1^c(p) \cos(\varphi_1) - f_1^s(p) \sin(\varphi_1) + q(p - p_1), \\ F_2(-p) = f_0(p) - f_2^c(p) \cos(\varphi_2) - f_2^s(p) \sin(\varphi_2) + q(p - p_2). \end{cases} \quad (6)$$

Заметим, что  $F_1(p), F_2(p)$  - экспериментально измеряемые функции проекций, регистрируемые под углами  $\varphi_1, \varphi_2$  соответственно, а  $p_1, p_2$  - координаты проекций «центров масс» возмущений на оси ортогональной направлениям проецирования. Для большинства практических случаев значения  $p_1, p_2$  определяются из экспериментальных данных, получаемых при регистрации проекций в заданных направлениях.

Совместное решение систем уравнений (5) и (6) дает достаточно конструктивный ответ на вопрос о синтезе алгоритма отделения «возмущения» и «фона». Экспериментальный анализ проекционных данных показал, что при двухракурсной геометрии регистрации данных, функции проекций, обычно содержат по одному до трех максимумов. Например, если обе проекции содержат по два максимума, то можно предложить следующий алгоритм реконструкции:

- Производится поточечное вычитание проекций, которые предварительно ориентируются таким образом, чтобы максимумы оказались в противоположных (различных) их половинах, то есть:  $F_R(p) = F_1(p) - F_2(p)$ .
- Вклад «фона» можно подавить, если его функция близка к аксиальной симметрии, а «возмущение» достаточно сильно локализовано, то есть:

$$F_R^+(p) = \begin{cases} F_R(p), & p \geq 0 \\ 0, & p < 0 \end{cases}, \quad F_R^-(p) = \begin{cases} F_R(p), & p \leq 0 \\ 0, & p > 0 \end{cases}. \quad (7)$$

- Полагая для определенности  $p_1 > 0$ , нетрудно заметить, что линейные комбинации:

$$F_1^p(p) = F_1(p) - F_R^+(p); F_2^p(p) = F_2(p) + F_R^-(p), \quad (8)$$

позволяют оценить вклад «фона» в каждой из проекций, а функции:

$$F_1^d(p) = F_R^+(p); F_2^d(p) = -F_R^-(p), \quad (9)$$

соответственно вклад «возмущения».

Для других случаев можно использовать модифицированные алгоритмы, предложенные авторами [4].

Рассмотренный подход, значительно упрощает дальнейшие процедуры МВТ – реконструкции: вычисление недостающих (промежуточных) проекций, операции свертки и обратного проецирования. Для реконструкции функций распределения, например, локальных температур в объеме

камеры сгорания необходимо использовать спектрально - томографический подход, то есть анализировать спектры проекций. На рис. 1,е представлена структурная схема спектрально – томографической системы для исследования пространственного распределения температур в камере сгорания. В силу конструктивных особенностей функции распределения локальных температур определяются в двумерной плоскости заданной ориентации. Предложенная спектрально - томографическая система диагностики работает следующим образом. Выходные торцы светопроводов -1 собираются в «последовательный» пакет, при этом предусмотрена возможность из синхронного поворота, с помощью механизма выборки ориентации плоскости сечения (на рис. 1,е) не показан. Одномерные функции проекции, соответствующие выбранному сечению, с помощью однолинзовой системы - 2 проецируются на входную щель - 3 монохроматора – 4. В его фокальной плоскости, таким образом, формируется  $(2 \div 3)$  спектра проекций, расположенных один под другим. Для расчета температур необходимо выбрать либо конечный интервал сплошного спектра, либо линии излучения, например, частиц несгоревшего углерода. В последнем случае, можно восстановить «локальные температуры» этих частиц, и таким образом, иметь косвенную информацию о локальных температурах пламени в этих же локальных объемах, при условии термодинамического равновесия между твердотельной и газовой компонентами. Считывание интенсивности излучения областей сплошного спектра, спектральных линий производится с помощью линейной ПЗС – матрицы – 6, которая перемещается в плоскости спектра с помощью электромеханической системы привода – 5. Так как яркость спектра излучения пламени мала, то для эффективной регистрации спектров проекций перед ПЗС – матрицей установлен линейный микроканальный усилитель интенсивности излучения, что позволило производить считывание трех проекций – опрос линейки за интервал времени  $1 \times 10^{-3}$  с. Управление процессами считывания в ПЗС – матрице, электромеханическими системами выборки сечений, перемещения ПЗС - матрицы в плоскости спектра, производится с помощью микропроцессорной системы управления – 8. Она позволяет хранить в своем ОЗУ исходные массивы данных и обеспечивает связь с ПК.

В заключении следует отметить, что предложенная система томографической диагностики ДВС может быть установлена практически на любой двигатель, смонтированный на стенде. Время непрерывной работы комплекта объективов до их очистки от нагара может достигать 5 мин, очистка входных линз производится через свечное отверстие, без демонтажа головки блока цилиндров. Стендовые испытания системы, показали ее высокую надежность, простоту в обслуживании, получаемые данные отличаются высокой достоверностью и наглядностью.



### Список использованных источников

1. Филонин О.В. Малоракурсная томография. - Самара: СНЦ РАН, 2006. - 256с.
2. Филонин О.В., Ерусалимский Л.И., Лагутская Л.И. Определение оптических характеристик потоков низкотемпературной плазмы методами вычислительной томографии./ Тез. докл. VI Всесоюзной конф. по физике низкотемпературной плазмы. - Ленинград, 1983. - С.294 -296.
3. Филонин О.В., Овсицер М.В. Томографическая диагностика переноса примесей в ТОКАМАКЕ / Сб. научн. тр. «Вычислительная томография».-Куйбышев: КуАИ 1990. - С. 27.
4. Филонин О.В., Ерусалимский Л.И., Овсицер М.В. Интерполяционный подход к задачам малоракурсной томографии /
5. Реконструктивная томография. – Куйбышев: КуАИ 1987. - С.18.

## ОСОБЕННОСТИ ПОДГОНКИ ТОЛСТОПЛОНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ СВЧ МИКРОПЛАТ

А.В.Столбиков

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Толстопленочные микроплаты работающие в СВЧ диапазоне имеют следующие особенности:

- малое количество пленочных слоев, обычно не превышающее 3-4;
- повышенные требования к точности изготовления пленочного рисунка проводящего слоя;
- количество резистивных слоев обычно не превышает одного-двух;
- необходимость дополнительных циклов термообработки в случае наличия торцев соединяющих лицевую сторону с экраном и металлизированных отверстий;
- применение проводящих паст содержащих малое количество палладия или не содержащих его, что повышает риск миграций серебра в области контакта проводник- резистор.

Проблема миграций серебра в случае применения серебропалладиевой пасты ПП-16 с соотношением серебропалладий 16:1 или серебряной пасты ПП-17 решается подбором наилучшего режима высокотемпературной обработки пленочных слоев. Как показали опыты при последовательном снижении температуры на  $5\text{ C}^0$  для каждого последующего пленочного слоя вероятность отсутствия миграций серебра повышается не менее, чем до 99,9%.

Однако задание жесткой границы верхней температуры термообработки проводящих слоев, накладывает ограничения на технологический