

УДК 621.384.8, 536.46, 531.3

Проект станции синхротронного излучения ВУФ диапазона для диагностики пламени*

О.П. КОРОБЕЙНИЧЕВ, А.Д. НИКОЛЕНКО, А.Г. ШМАКОВ, И.Е. ГЕРАСИМОВ,
А.М. ДМИТРИЕВ, С.А. ЯКИМОВ, Д.А. КНЯЗЬКОВ, Л.В. КУЙБИДА, П.С. ЗАВЕРТКИН,
Д.В. ИВЛЮШКИН, М.Р. МАШКОВЦЕВ, В.Ф. ПИНДЮРИН, А.Е. СОЛДАТОВ

Описан проект станции синхротронного излучения, которая позволит проводить фундаментальные исследования пламени, включая кинетику и механизм химических превращений в пламени на уровне элементарных стадий, а также механизм и кинетику превращений при термическом разложении конденсированных веществ. Принцип действия установки основан на масс-спектрометрическом анализе промежуточных продуктов горения, отобранных из различных участков пламени. Ионизация изучаемых продуктов для их анализа происходит с применением синхротронного излучения (СИ) ВУФ диапазона (энергия фотонов 5–20 эВ). Станция базируется на сверхвысоковакуумном канале СИ, оснащенный дифференциальной откачкой. Оптическая схема станции включает в себя монохроматор с плоской решеткой и фокусирующими зеркалами. В работе кратко описаны основные параметры станции, компоновочная и оптическая схемы канала вывода СИ и анализатора. Предложенная станция будет единственной в России и одной из трех в мире.

Ключевые слова: синхротронное излучение, дифракционная решетка, сверхвысоковакуумные установки, ВУФ, молекулярный пучок, масс-спектрометрия, структура пламени, механизм химических реакций.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование структуры пламени, т. е. пространственного распределения исходных, конечных и промежуточных продуктов горения, а также температуры имеет решающее значение для понимания физики и химии процессов, происходящих в пламени. Молекулярно-пучковая зондовая масс-спектрометрия оказалась наиболее информативным методом изучения структуры газовых пламен, обычно при пониженных (около 0.1 атм.) давлениях [1]. Применение данного метода для изучения пламени при атмосферном и более высоком давлении сопряжено с рядом дополнительных экспериментальных сложностей. Тем не менее такие работы ведутся достаточно успешно [2–4]. В лабораторных установках для ионизации изучаемых продуктов реакций обычно используется метод ионизации электронным ударом. Однако в последнее десятилетие все большее распространение получают установки, использующие для этой цели синхротронное излучение (СИ) ВУФ диапазона (5–20 эВ). Пучок СИ проходит через монохроматор со спектральным разрешением $E/\Delta E = 500\text{--}2000$ и взаимодействует с молекулярной струей, формируемой с помощью системы формирования молекулярного «замораживания» пробы в процессе ее отбора и доставки в зону ионизации. Система формирования молекулярного пучка состоит из пробоотборника и набора коллимирующих сопел, оснащенных многоступенчатой дифференциальной откачкой. Такая конструкция позволяет регистрировать и измерять концентрации лабильных и короткоживущих соединений, в том числе атомов и свободных радикалов в пламенах, а также и в других реагирующих средах.

* Статья получена 10 октября 2012 г.

Подобного рода установки успешно функционируют на зарубежных источниках синхротронного излучения (ALS, США и NSRL, Китай) [5, 6]. Преимуществом применения фотонной ионизации по сравнению с ионизацией электронным ударом является:

- 1) возможность перестройки излучения в широкой области спектра;
- 2) интенсивный поток фотонов;
- 3) высокое разрешение по энергии;
- 4) преобладание однофотонных процессов, отсутствие фрагментации частиц.

Благодаря высокому разрешению фотонного пучка по энергии возможно детектирование частиц при энергиях ионизирующего излучения больших, чем потенциал ионизации интересующей частицы, но не превышающих потенциалы ионизации частиц с такой же или близкой массой. Это позволяет разделять сигналы от изомерных соединений, что практически невозможно при других методах ионизации. Сечение ионизации в этом диапазоне энергий невелико, однако высокая интенсивность СИ позволяет добиться приемлемого соотношения сигнал/шум.

Станция, описанная в настоящей работе, будет функционировать в рамках Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения (СЦСТИ) на территории Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск) и использовать излучение из поворотного магнита электрон-позитронного накопителя ВЭПП-4М [7, 8]. Предлагаемая станция оснащается решеточным монохроматором. Анализатор станции оснащается коническими кварцевыми (SiO_2) или корундовыми (Al_2O_3) пробоотборниками для отбора продуктов горения из пламени или из реактора термического разложения, плоскими водоохлаждаемыми горелками для стабилизации пламен газообразных горючих смесей, сканирующим механизмом для перемещения горелки относительно пробоотборника, реактором для изучения термического разложения соединений, времяпролетным масс-спектрометром, позволяющим измерять масс-спектр анализируемой пробы в диапазоне масс от 1 до 200 а.е.м. В отличие от зарубежных установок, которые позволяют проводить исследования процессов горения и термического разложения веществ лишь при низких давлениях – 20–40 торр, в предлагаемой установке процессы горения могут быть изучены при давлениях на два порядка больше (1–10 атм.), что близко к условиям, при которых происходит горение на практике.

1. КАНАЛ ВЫВОДА СИ И СХЕМА СТАНЦИИ

1.1. Компоновка канала вывода СИ

Предлагаемая станция (рабочее название – станция «Пламя») использует излучение из поворотного магнита накопителя ВЭПП-4М. Предполагаемое место установки станции – фронтенд ныне действующей станции «Космос» [9]. Станция «Пламя» использует инфраструктуру фронтенда, обеспечивающую предварительную коллимацию пучка СИ, его оперативное перекрытие радиационными затворами, систему дифференциальной откачки и систему быстродействующей вакуумной защиты канала СИ на случай аварийного прорыва атмосферы со стороны станции (рис. 1).

В случае работы станции «Пламя» в пучок вводится фокусирующее зеркало, которое расположено в районе отметки 13 метров от точки излучения. Белый пучок СИ претерпевает отражение от зеркала и отклоняется под прямым углом вертикально вверх, проходит через потолок защищенного помещения накопителя, одновременно являющегося частью биозащиты бункера СИ. Далее отраженный пучок попадает в систему монохроматизации станции, где он претерпевает повторное отражение под углом 90° , восстанавливая свое горизонтальное положение. Предложенная компоновка станции позволяет территориально разделить новую ВУФ станцию с существующими рентгеновскими станциями бункера СИ ВЭПП-4М. Расположение станции также позволит существенно снизить требования к ее радиационной защите и упростит технические меры по обеспечению взрыво-пожаробезопасности.

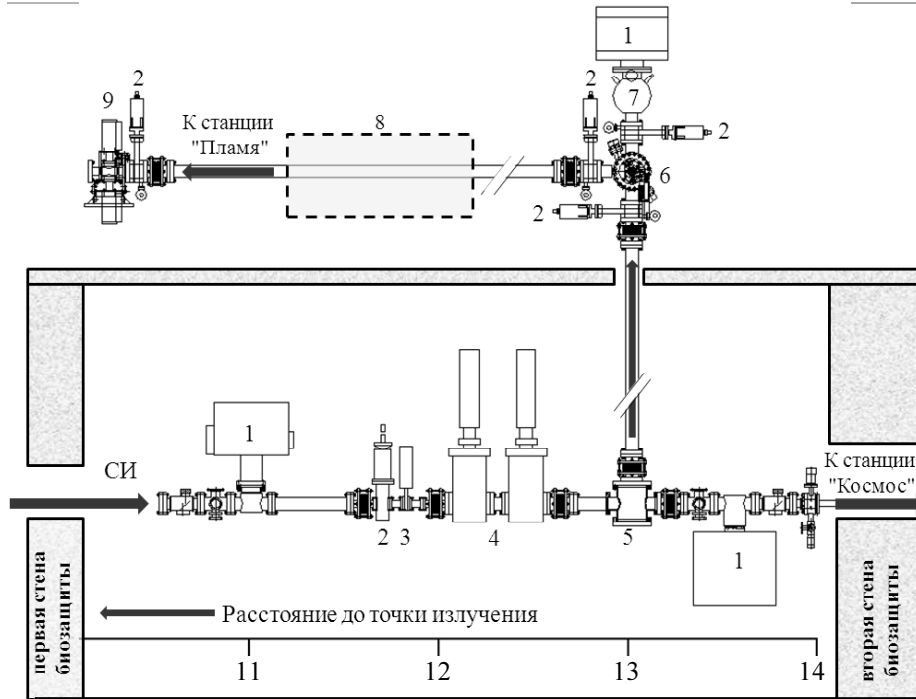


Рис. 1. Компоновка канала:

1 – магнеторазрядные насосы; 2 – вакуумные шиберы; 3 – аварийный быстродействующий (10 мс) шибер аварийной защиты вакуума; 4 – радиационные затворы; 5 – блок вводимого фокусирующего зеркала; 6 – блок дифракционной решетки; 7 – азотная ловушка; 8 – газовый фильтр; 9 – выходная щель. В нижней части рисунка показано расстояние до точки излучения в метрах

Вакуум в канале обеспечивается магнеторазрядными насосами и азотными ловушками, устраняющими из остаточного газа водяные пары и органические соединения.

1.2. Оптическая схема станции

Слабо расходящийся пучок СИ попадает на первое сферическое зеркало с радиусом кривизны 12 м. Угол падения пучка на зеркало – 45° , поперечный размер пучка, захватываемого зеркалом, составляет 30×40 мм. Отраженный пучок является слабо сходящимся и направлен вертикально вверх, перпендикулярно медианной плоскости накопителя. На высоте 1.7 м от медианной плоскости накопителя пучок проходит через потолочное перекрытие защищенного зала ВЭПП-4М, а на высоте 3.2 м попадает на плоскую дифракционную решетку (1500 штрихов на мм). Угол между падающим и дифрагированным пучком составляет 90° , в результате чего пучок вновь переходит в горизонтальную плоскость (рис. 2).

Дисперсия пучка по энергии фотонов происходит в вертикальной плоскости. При сканировании по спектру решетка вращается по часовой стрелке на угол δ , изменяя одновременно угол падения $\alpha = (45^\circ + \delta)$ и угол дифракции ($\beta = 45^\circ - \delta$). Зависимость рабочей длины волны следует прямо из основного уравнения решетки [10]:

$$m\lambda(\delta) = d(\sin(45^\circ - \delta) - \sin(45^\circ + \delta)),$$

где λ - длина волны излучения; d – период штрихов решетки; $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ - порядок отражения.

На расстоянии 4.8 м от решетки находится вертикальный фокус сферического зеркала. В этой точке установлена выходная щель с вертикальным размером 0.5 мм. Щель определяет спектральное разрешение монохроматора, составляющее около 1. Для устранения паразитных бликов вдоль канала установлено несколько коллимирующих щелей. При сканировании

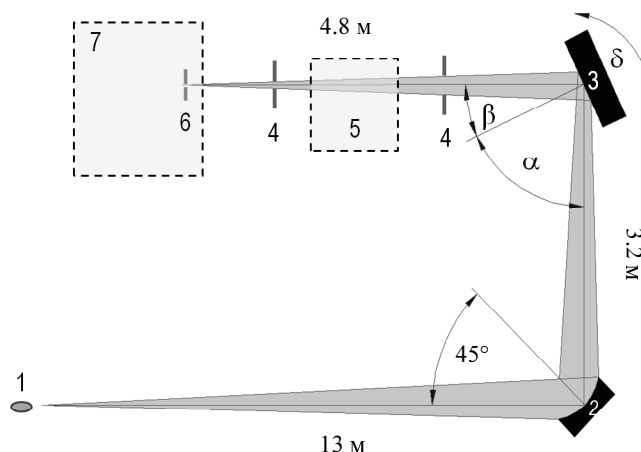


Рис. 2. Оптическая схема станции:

1 – точка излучения; 2 – сферическое зеркало; 3 – плоская дифракционная решетка; 4 – коллимирующие щели; 5 – газовый фильтр кратных гармоник; 6 – входная щель анализатора; 7 – анализатор

решеткой в пределах $4^\circ \dots 16.5^\circ$ энергия фотонов изменяется в диапазоне 6–25 эВ (2000–500), при этом относительное спектральное разрешение ($\lambda/\Delta\lambda$) изменяется от 2000 до 500, соответственно. С целью увеличения потока фотонов также предусмотрена возможность плавного увеличения вертикального размера выходной щели монохроматора от 0.5 (для энергии 20 эВ) до 2 мм (для энергии 5 эВ). В результате спектральное разрешение монохроматора остается постоянным ($\lambda/\Delta\lambda = 500$), а поток фотонов в мягкой области рабочего спектра увеличивается до четырех раз. Выходная щель монохроматора одновременно является входной щелью анализатора. Большое расстояние от решетки до выходной щели монохроматора (более 4 метров) дает возможность установить на станцию газовый фильтр, который позволяет подавлять кратные гармоники монохроматора. Устройство подобного рода фильтра описано в работе [11].

1.3. Расчетный поток фотонов

Для расчета потока фотонов использовались штатные значения основных параметров накопителя. Радиус поворота орбиты электронного пучка в точке излучения составляет 19.28 м, энергия пучка в накопителе, в зависимости от его текущего режима, варьируется в пределах от 1.8 до 4.5 ГэВ, ток электронов в накопителе – до 40 мА. Размер пучка СИ, захватываемого фокусирующим зеркалом, составляет $30 \times 30 \text{ мм}^2$. Учет спектральной избирательности монохроматора позволяет оценить поток фотонов в рабочую апертуру станции с учетом спектрального разрешения монохроматора и потерь на отражение от оптических элементов величиной 10^{12} фотонов/сек.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА СТАНЦИИ

2.1. Компоновка спектрометра

Установки, позволяющие реализовать метод молекулярно-пучковой зондовой масс-спектрометрии, успешно разрабатывались в течение ряда лет в сотрудничестве Института химической кинетики и горения СО РАН (ИХКГ СО РАН) и Специального конструкторского бюро научного приборостроения СО РАН (СКБНП СО РАН). Так, в работах [12–15] описана конструкция установок первого и второго поколений. Установка, предлагаемая для новой станции, относится к третьему поколению. Она успешно применялась для изучения структуры пламен в лабораторных условиях с использованием метода ионизации электронным ударом и после модернизации может быть использована в составе станции СИ.

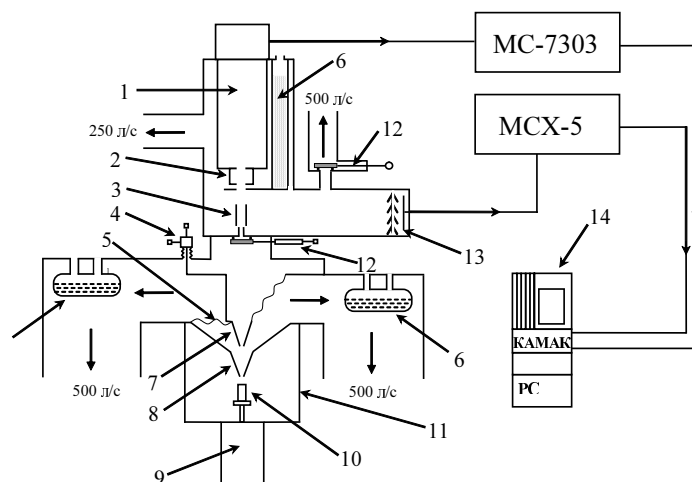


Рис. 3. Схема установки:

1 – квадрупольный масс-спектрометр; 2 – ионный источник квадрупольного масс-спектрометра; 3 – ионный источник ВПМС; 4 – трёхкоординатный механизм юстировки скиммера; 5 – резиновая мембрана; 6 – азотная ловушка; 7 – скиммер; 8 – зонд; 9 – сканирующий механизм; 10 – горелка; 11 – камера сгорания; 12 – шибберный затвор; 13 – ВЭУ; 14 – система сбора данных

На рис. 3 показана схема масс-спектрометрической установки с молекулярно-пучковым зондовым пробоотбором. Установка может быть укомплектована двумя камерами сгорания на давление до 100 и до 150 атм.

2.2. Камера сгорания на давление до 10 атм

Камера сгорания (рис. 4) объемом 1 литр разработана для рабочих давлений от 0.1 до 10 атм. Корпус изготовлен из нержавеющей стали. Окно для визуального наблюдения и видеосъемки диаметром 50 мм изготовлено из пакета стекол. Обдув стекла предотвращает потерю прозрачности при конденсации паров веществ и сжигании коптящих составов.

Для поддержания в процессе горения образца постоянного давления предусмотрено подключение к камере ресивера, имеющего объем 3 л, а также клапана стабилизации давления. Опыт эксплуатации и специальные измерения показали, что в самом неблагоприятном случае клапан позволяет стабилизировать давление с точностью не хуже чем 0.1 атм.

В верхней части камеры сгорания установлен водоохлаждаемый фланец для крепления зонда. В нижней части камеры имеется быстроразъемное соединение для сканирующего механизма горелки.

2.3. Сканирующий механизм

Сканирующий механизм служит для крепления и перемещения горелки. Кроме того, на нём смонтировано устройство поджига (для работы при повышенном давлении) и имеется тоководы для установки печи предварительного прогрева и вспомогательных термопар. Механизм перемещения горелки построен на шаговом двигателе и позволяет перемещать горелку с шагом 2.5 мкм в диапазоне до 40 мм.

2.4. Зонд

В зависимости от температуры исследуемого пламени и от продолжительности процесса горения используются два типа зондов. При температуре пламени до 1400 °С используются кварцевые зонды. Зонд (рис. 5) представляет собой конус с углом раствора около 40° и диаметром основания 20 мм.

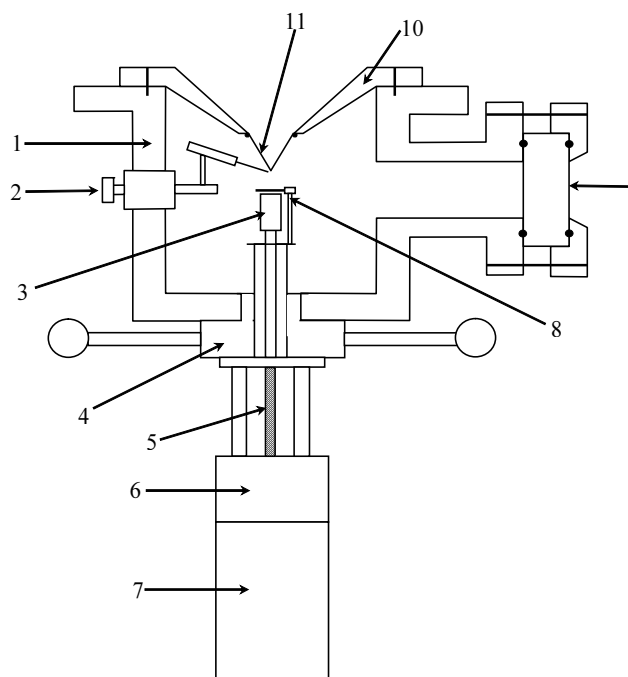


Рис. 4. Камера сгорания:

1 – корпус; 2 – крепление термопары; 3 – горелка; 4 – быстроразъемное соединение; 5 – винтовая передача; 6 – редуктор; 7 – шаговый двигатель ШД-5Д; 8 – устройство поджига; 9 – окно; 10 – водоохлаждаемый фланец крепления зонда; 11 – зонд

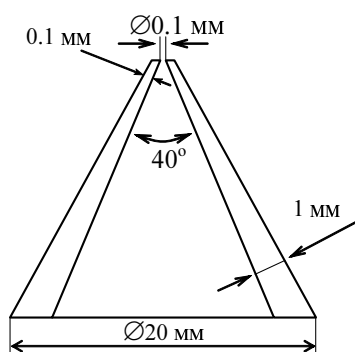


Рис. 5. Кварцевый зонд для давления 1 атм

При давлении 1 атм применяется зонд с диаметром отверстия 80–100 мкм, а при давлении 10 атм – 20 мкм. Согласно рекомендациям [16], основанным на опыте зондирования разреженного газового пламени, угол раствора зонда 40° является оптимальным. Большой угол раствора приводит к заметным искажениям пламени, а при меньшем не исключены эффекты реагирования отбираемых продуктов внутри зонда, т. е. замораживание химических реакций происходит недостаточно быстро.

В случае высоких температур пламени используются зонды из окиси алюминия. Геометрически такой зонд подобен кварцевому, но изготавливается из алюминия высокой чистоты, и после механической обработки подвергается электролитическому оксидированию на глубину до 100 мкм, в результате чего кончик зонда полностью превращается в окись алюминия Al_2O_3 .

2.5. Система формирования молекулярного пучка

Применение молекулярного пучка является наилучшим способом доставки пробы в ионный источник масс-спектрометра. В процессе свободного расширения газа в вакуум в коническом канале зонда как в сопле формируется газодинамическая сверхзвуковая струя. Расширение происходит в камеру, откачиваемую со скоростью 500 л/сек турбомолекулярным насосом ВМН-500. При расширении газа на расстоянии нескольких диаметров отверстия зонда происходит понижение температуры и давления газа в несколько раз, что приводит к полному замораживанию химических реакций.

Максимальный диаметр отверстия зонда ограничен максимальным входным давлением насоса (10^{-3} торр). При атмосферном давлении и комнатной температуре это 80–100 мкм. Таким образом, сверхзвуковая струя газа расширяется в область с фоновым давлением не более 10^{-3} торр. При таком давлении согласно оценкам, проведенным по данным [17], расстояние от отверстия зонда вниз по потоку до диска Маха не менее 25 мм. Чуть ближе этого расстояния, в 20 мм от отверстия зонда, располагается скиммер, представляющий собой коническое отверстие диаметром 1 мм с острыми краями, который вырезает из струи центральную невозмущенную часть, пропуская ее во вторую вакуумную камеру, откачиваемую до рабочего давления $2 \cdot 10^{-5}$ торр также насосом ВМН-500. Во второй вакуумной камере частицы молекулярного пучка не испытывают столкновений ни между собой, ни с молекулами фонового газа. Пролетая через коллимирующее отверстие диаметром 3 мм, пучок попадает в третью вакуумную камеру, где расположены ионные источники и другие элементы масс-спектрометров. Эта камера откачивается насосом ВМН-500 и дополнительно ионным насосом НОРД-250, имеющим производительность 250 л/сек. Рабочее давление в третьей камере $3 \cdot 10^{-7}$ торр. Проблема юстировки отверстий зонда, скиммера и коллиматора решена применением трехкоординатного механизма перемещения скиммера.

2.6. Масс-спектрометры

В качестве детекторов молекулярного пучка используются два масс-спектрометра: времяпролетный МСХ-5 и квадрупольный МС-7303. Молекулярный пучок проходит без рассеяния между сеток ионного источника ВПМС, где лишь незначительная часть превращается в ионы, и попадает в аксиально-симметричный ионный источник квадрупольного масс-спектрометра.

Времяпролетный масс-спектрометр (ВПМС) МСХ-5 имеет время развертки спектра 100 мкс с неограниченным диапазоном масс при разрешении по массам $M/\Delta M$ около 200.

Квадрупольный масс-спектрометр МС-7303 имеет диапазон масс от 2 до 500 со временем развертки ста масс около секунды. Квадрупольный масс-спектрометр обладает на три порядка более высокой чувствительностью, что позволяет измерять в процессе зондирования поведение очень слабых линий масс-спектра, в том числе ответственных за атомы и радикалы, одновременно измеряя полный спектр (интенсивные линии) с помощью ВПМС.

2.7. Система управления, сбора и обработки информации

Система сбора данных построена на основе ЭВМ типа IBM PC, сопряженной с набором модулей КАМАК и цифровым осциллографом LeCroy 9310AL.

Времяпролетный масс-спектрометр работает в режиме внешнего запуска с частотой 10 кГц, вырабатываемой таймером. Система сбора данных позволяет производить стократное накопление сигнала и измерять в течение одной развертки интенсивности шести пиков масс-спектра.

Для самых быстрых измерений совместно с ВПМС используется цифровой осциллограф LeCroy 9310AL, имеющий два канала 8-разрядного 100 МГц аналогово-цифрового преобразования с памятью 1 Мбайт на канал. Он позволяет осуществлять запись до 1000 масс-спектров без накоплений и усреднений.

Система работает под управлением программы, написанной на языке Паскаль. Результаты могут быть сохранены в базе данных, импортированы в Excel или SigmaPlot, выведены на печать в виде графиков и таблиц.

2.8. Устройство для термического разложения конденсированных систем

В лаборатории кинетики процессов горения ИХКГ СО РАН впервые был разработан метод дифференциального масс-спектрометрического анализа для изучения кинетики и механизма термического разложения конденсированных систем [2, 18]. В этом методе проточный реактор с нагреваемым образцом сопряжен с времяпролетным масс-спектрометром. Суть и особенность методики состоит в том, что регистрируемые с ее помощью интенсивности пиков I_i в масс-спектре пробы, отобранной на выходе из реактора, прямо пропорциональны скорости выделения соответствующих продуктов разложения W_i :

$$W_i = W_{Ar} k_i (I_i / I_{Ar}),$$

где k_i – коэффициент пропорциональности; I_{Ar} , W_{Ar} – интенсивность пика и скорость потока инертного разбавителя (аргона), в струе которого изучается реакция разложения. Метод опубликован в 1973 году [19, 20] раньше специалистов фирмы Balzers, представивших в 1974 году доклад на IV Международную конференцию по термическому анализу с описанием аналогичного метода [21].

Установки для термического разложения конденсированных веществ могут быть применены при изучении пиролиза биотоплив, полимеров, лесных горючих материалов и других систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создаваемая станция в Центре коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения» (ЦКП СЦСТИ) позволит проводить фундаментальные исследования пламени, включая кинетику и механизм химических превращений в пламени на уровне элементарных стадий, а также исследовать механизм и кинетику превращений при термическом разложении конденсированных веществ. Станция может быть также применена при изучении пиролиза биотоплив, полимеров, лесных горючих материалов и других систем.

Особенностью станции будет являться возбуждение продуктов горения монохроматическим синхротронным излучением с энергией фотонов в диапазоне 5...20 эВ, а не обычно используемым методом ионизации электронным ударом. Это создает дополнительные экспериментальные преимущества при исследовании процессов горения: возможность перестройки возбуждающего излучения в широкой области спектра; интенсивный поток фотонов; высокое разрешение по энергии; преобладание однофотонных процессов, отсутствие фрагментации частиц. В России отсутствуют такие станции, и создаваемая станция будет одной из немногих в мире.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, в рамках развития ЦКП СЦСТИ, а также в рамках соглашения № 8186 «Разработка аппаратуры и методов диагностики процессов горения на основе фотоионизационной масс-спектрометрии с использованием синхротронного излучения ВУФ диапазона и их применение для создания модели горения биодизельных топлив».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Fristrom R.M.** Flame Structure and Processes / R.M. Fristrom. – N.Y.: Oxford University Press, 1994.
- [2] **Коробейничев О.П.** Динамическая зондовая масс-спектрометрия пламен и процессов разложения конденсированных систем / О.П. Коробейничев // ФГВ – 1987. – № 5. – С. 64–76.
- [3] **Коробейничев О.П.** Исследование химической структуры пламени октогена / О.П. Коробейничев, Л.В. Куйбида, В.Ж. Мадирбаев // ФГВ. – 1984. – № 3.

- [4] **Korobeinichev O.P.** Study of Solid Propellant Flame Structure By Mass-Spectrometric Sampling / O.P. Korobeinichev, L.V. Kuibida, A.A. Paletsky // *Combustion Science and Technology*. – 1996. – Vol. 113–114. – P. 557–571.
- [5] **Fei Qi Rui Yang.** Isomeric identification of polycyclic aromatic hydrocarbons formed in combustion with tunable vacuum ultraviolet photoionization / Fei Qi Rui Yang, Bin Yang, Chaoqun Huang, Lixia Wei, Jing Wang, Liusi Sheng, and Yunwu Zhang // *Rev. Sci. Instrum.* – 2006. – Vol. 77. – P. 084101-1, 084101-5.
- [6] **Heimann P.A.** Performance of the vacuum ultraviolet high-resolution and high-flux beamline for chemical dynamics studies at the Advanced Light Source / P.A. Heimann, M. Koike, C.W. Hsu, D. Blank, X.M. Yang, A.G. Suits, Y.T. Lee, M. Evans, C.Y. Ng, C. Flaim, H.A. Padmore // *Rev. Sci. Instrum.* – 1997. – Vol. 68 (5). – P. 1945–1951.
- [7] <http://v4.inp.nsk.su/>.
- [8] **Fedotov M.G.** SR front ends of VEPP-4M storage ring / M.G. Fedotov, M.A. Kholopov, V.S. Kuz'minykh, L.A. Mironenko, S.I. Mishnev, V.E. Panchenko, I.Ya. Protopopov, V.V. Rachkova, L.P. Rukhlyada, A.N. Selivanov // *Nucl. Instr. and Meth.* – 2001. – Vol. A470. – № 1–2. – P. 89–93.
- [9] **Николенко А.Д.** Станция «Космос». Использование синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-4 для метрологических измерений в ВУФ и мягком рентгеновском диапазонах / А.Д. Николенко, С.В. Авакян, И.М. Афанасьев, Н.А. Воронин Н.В. Коваленко, А.А. Легкодымов, В.В. Лях, В.Ф. Пиндюрин // *Поверхность*. – 2011. – № 5. – С. 1–7.
- [10] Lawrence Berkeley National Laboratory Synchrotron Radiation // *X-ray Data Booklet*. – 2001. – P. 4–17.
- [11] **Arthur G. Suits.** A differentially pumped harmonic filter on the Chemical Dynamics Beamline at the Advanced Light Source / Arthur G. Suits, Philip Heimann, Xueming Yang, Matt Evans, Chia-Wei Hsu, Kuieh-tzu Lu, Yuan T. Lee // *Rev. Sci. Instrum.* – 1995. – Vol. 66 (10). – P. 4841–4844.
- [12] **Коробейничев О.П.** Устройство для исследования процесса горения твёрдых топлив / О.П. Коробейничев, Л.В. Куйбида, С.В. Полозов и др. // Авторское свидетельство № 756279, Бюллетень Изобретений, 1980, № 3.
- [13] **Воробьёва А.Г.** Автоматизированный масс-спектрометрический комплекс для исследования структуры пламени и проведения термического анализа / А.Г. Воробьёва, О.П. Коробейничев, Л.В. Куйбида, С.В. Полозов и др. // *Автометрия*. – 1982. – № 5. – С. 40.
- [14] **Коробейничев О.П.** Автоматизированный времяпролётный масс-спектрометр с молекулярно-пучковым отбором пробы / О.П. Коробейничев, Л.В. Куйбида, М.Г. Марасанов, С.В. Полозов, В.Б. Быстренко // *ПТЭ*. – 1987. – № 2. – С. 154–156.
- [15] **Amosov K.A.** Automated mass-spectrometric complex with molecular beam system for investigating flame structure / K.A. Amosov, L.V. Kuibida, O.P. Korobeinichev, T.A. Bolshova // *In Flame structure*. (Ed. O.P. Korobeinichev), Novosibirsk, Nauka, S.B. – 1991. – Vol. 1. – P. 93–98.
- [16] **Biordi J.C.** Molecular beam mass spectrometry applied to determining the kinetics of reactions in flames. I. Empirical characterization of flame perturbation by molecular beam sampling probes / J.C. Biordi, C.P. Lazarra, J.F. Papp // *Comb. Flame*. – 1974. – Vol. 23. – № 1. – P. 73–82.
- [17] **Miller D.R.** In: *Atomic and molecular beam methods* (G.Scoles, ed.), Vol. 1 / D.R. Miller. – N.Y., Oxford University Press, 1988. – P. 14.
- [18] **Korobeinichev O.P.** High-temperature decomposition of ammonium perchlorate – polystyrene – catalyst mixtures / O.P. Korobeinichev, G.I. Anisiforov, A.G. Tereshenko // *AIAA Journal*. – 1975. – Vol. 13. – № 5. – P. 628–633.
- [19] **Коробейничев О.П.** V Всесоюзное совещание по термическому анализу / О.П. Коробейничев, Г.И. Анисифоров. – М.: Наука, 1973.
- [20] **Korobeinichev O.P.** – *Thermal analysis*, Vol. 1 / O.P. Korobeinichev, V.G. Voronov, G.I. Anisiforov e. a. – Budapest: Akademiai Kiado, 1975.
- [21] **Dünner W.** – *Thermal analysis*, Vol. 1 / W. Dünner, H. Eppler. – Budapest: Akademiai Kiado, 1975.

REFERENCES

- [1] Fristrom R.M. *Flame Structure and Processes*. N.Y.: Oxford University Press, 1994.
- [2] O.P. Korobeinichev. Dinamicheskaja zondovaja mass-spektrometrija plamen i processov razlozhenija kondensirovannyh sistem // *FGV* 1987. № 5. S. 64–76.
- [3] O.P. Korobeinichev, L.V. Kujbida, V.Zh. Madirbaev. Issledovanie himicheskoj struktury plameni oktogena // *FGV* 1984, № 3.
- [4] Korobeinichev O.P., Kuibida L.V., Paletsky A.A. Study of Solid Propellant Flame Structure By Mass-Spectrometric Sampling // *Combustion Science and Technology*. 1996. Vols. 113–114. Pp. 557–571.
- [5] Fei Qi Rui Yang, Bin Yang, Chaoqun Huang, Lixia Wei, Jing Wang, Liusi Sheng, and Yunwu Zhang. Isomeric identification of polycyclic aromatic hydrocarbons formed in combustion with tunable vacuum ultraviolet photoionization // *Rev. Sci. Instrum.* – 2006. – Vol. 77. – Pp. 084101-1, 084101-5.
- [6] P.A. Heimann, M. Koike, C.W. Hsu, D. Blank, X.M. Yang, A.G. Suits, Y.T. Lee, M. Evans, C.Y. Ng, C. Flaim, H.A. Padmore. Performance of the vacuum ultraviolet high-resolution and high-flux beamline for chemical dynamics studies at the Advanced Light Source // *Rev. Sci. Instrum.* – 1997. – Vol. 68 (5). – Pp. 1945–1951.
- [7] <http://v4.inp.nsk.su/>
- [8] M.G. Fedotov, M.A. Kholopov, V.S. Kuz'minykh, L.A. Mironenko, S.I. Mishnev, V.E. Panchenko, I.Ya. Protopopov, V.V. Rachkova, L.P. Rukhlyada, A.N. Selivanov. SR front ends of VEPP-4M storage ring // *Nucl. Instr. and Meth.* – 2001. – V. A470. – No. 1-2. – P. 89–93.
- [9] A.D. Nikolenko S.V. Avakjan, I.M. Afanas'ev, N.A. Voronin, N.V. Kovalenko, A.A. Legkodymov, V.V. Ljah, V.F. Pindjurin. Stancija "Kosmos". Ispol'zovanie sinhrotronnogo izlucheniya iz napoitelja VJePP-4 dlja metrologicheskikh izmerenij v VUF i mjagkom rentgenovskom diapazonah // *Poverhnost'*. – 2011. – № 5. – S. 1–7.
- [10] Lawrence Berkeley National Laboratory Synchrotron Radiation // *X-ray Data Booklet*. – 2001. – Pp. 4–17.

- [11] Arthur G. Suits, Philip Heimann, Xueming Yang, Matt Evans, Chia-Wei Hsu, Kuieh-tzu Lu, and Yuan T. Lee. A differentially pumped harmonic filter on the Chemical Dynamics Beamline at the Advanced Light Source // *Rev. Sci. Instrum.* – 1995. – Vol. 66 (10). – Pp. 4841–4844.
- [12] O.P. Korobejnichev, L.V. Kujbida, S.V. Polozov i dr. Ustrojstvo dlja issledovanija processa gorenija tvjordyh topliv // *Avtorskoe svidetel'stvo № 756279, B'ulleten' Izobretenij*, 1980, № 3.
- [13] A.G. Vorob'jova, O.P. Korobejnichev, L.V. Kujbida, S.V. Polozov i dr. Avtomatizirovannyj mass-spektrometričeskij kompleks dlja issledovanija struktury plameni i provedenija termičeskogo analiza // *Avtometrija* 1982. № 5. S. 40.
- [14] O.P. Korobejnichev, L.V. Kujbida, M.G. Marasanov, S.V. Polozov, V.B. Bystrenko. Avtomatizirovannyj vremjaproljotnyj mass-spektrometr s molekularno-puchkovym otborom proby // *PTJe*. 1987. № 2. S. 154–156.
- [15] Amosov K.A., Kuibida L.V., Korobeinichev O.P., Bolshova T.A. Automated mass-spectrometric complex with molecular beam system for investigating flame structure // *In Flame structure*. (Ed. O.P.Korobeinichev), Novosibirsk, Nauka, S.B. 1991. – V. 1. – Pp. 93–98.
- [16] Biordi J.C., Lazarra C.P., Papp J.F. Molecular beam mass spectrometry applied to determining the kinetics of reactions in flames. I. Empirical characterization of flame perturbation by molecular beam sampling probes // *Comb. Flame*. 1974. V. 23. № 1. P. 73–82.
- [17] D.R. Miller. In: *Atomic and molecular beam methods* (G. Scoles, ed.), V. 1, N.Y., Oxford University Press, 1988, P. 14.
- [18] O.P. Korobeinichev, G.I. Anisiforov, A.G. Tereshenko. High-temperature decomposition of ammonium perchlorate – polystyrene – catalyst mixtures // *AIAA Journal*. 1975. V. 13. No 5. Pp. 628–633.
- [19] O.P. Korobejnichev, G.I. Anisiforov. V kn.: *V Vsesojuznoe soveshhanie po termičeskomu analizu*, M.: Nauka, 1973.
- [20] O.P. Korobeinichev, V.G. Voronov, G.I. Anisiforov e. a. – In: *Thermal analysis*, Vol. 1. Budapest: Akademiai Kiado, 1975.
- [21] W. Dünner and H. Eppler. - In: *Thermal analysis*, Vol. 1. Budapest: Akademiai Kiado, 1975.

Коробейничев Олег Павлович, главный научный сотрудник Института химической кинетики и горения СО РАН. Основное направление исследований – химия горения углеводородных и биодизельных топлив, механизм действия ингибиторов горения и антипиринов, кинетика термического разложения конденсированных веществ, методы тушения пожаров, масс-спектрометрия химическая физика горения. Имеет более 250 публикаций. E-mail: korobein@kinetics.nsc.ru

Николенко Антон Дмитриевич, старший научный сотрудник Института ядерной физики им. Будкера СО РАН. Основное направление исследований – использование синхротронного излучения, рентгеновская и ВУФ-оптика, детекторы рентгеновского и ВУФ излучения. Имеет 16 публикаций. E-mail: A.D.Nikolenko@inp.nsk.su

Шмаков Андрей Геннадьевич, аведующий лабораторией Института химической кинетики и горения СО РАН. Основное направление исследований – кинетика процессов горения углеводородных и биодизельных топлив, механизм действия ингибиторов горения и антипиринов, кинетика термического разложения конденсированных веществ, методы тушения пожаров, масс-спектрометрия. Имеет более 150 публикаций. E-mail: shmakov@kinetics.nsc.ru

Герасимов Илья Евгеньевич, инженер Института химической кинетики и горения СО РАН. Основное направление исследований – кинетика процессов горения углеводородных и биодизельных топлив, масс-спектрометрия. Имеет 3 публикации. E-mail: gerasimov@kinetics.nsc.ru

Дмитриев Артем Михайлович, инженер Института химической кинетики и горения СО РАН. Основное направление исследований – кинетика процессов горения биодизельных топлив, масс-спектрометрия. Имеет 2 публикации. E-mail: artem_dmitriev@inbox.ru

Якимов Сергей Александрович, научный сотрудник Института химической кинетики и горения СО РАН. Основное направление исследований – кинетика процессов горения биодизельных топлив, масс-спектрометрия. Имеет 18 публикаций. E-mail: yakimov@kinetics.nsc.ru

Князьков Денис Анатольевич, научный сотрудник Института химической кинетики и горения СО РАН. Основное направление исследований – кинетика процессов горения биодизельных топлив, масс-спектрометрия. Имеет 47 публикаций. E-mail: knyazkov@kinetics.nsc.ru

Куйбиды Леонид Васильевич, старший научный сотрудник Института химической кинетики и горения СО РАН. Основное направление исследований – кинетика и механизм химических реакций с участием возбужденных атомов и молекул, химические реакции инициированные ИК-лазерным излучением, методы диагностики газофазных химических реакций, хромато-масс-спектрометрия. Имеет 89 публикаций. E-mail: kuibida@kinetics.nsc.ru

Заверткин Павел Сергеевич, аспирант Института ядерной физики им. Будкера СО РАН. Основное направление исследований – использование синхротронного излучения, автоматизация эксперимента, детекторы рентгеновского и ВУФ излучения. Имеет 1 публикацию. E-mail: Pzav@me.com

Ивлюшкин Денис Валерьевич, аспирант Института ядерной физики им. Будкера СО РАН. Основное направление исследований – использование синхротронного излучения, рентгеновская и ВУФ оптика, детекторы рентгеновского и ВУФ излучения. Имеет 2 публикации. E-mail: denis.ivlyushkin@gmail.com

Машковцев Михаил Рудольфович, аспирант Института ядерной физики им. Будкера СО РАН. Основное направление исследований – использование синхротронного излучения, рентгеновские фильтры, детекторы рентгеновского и ВУФ излучения. Имеет 2 публикации. E-mail: mashkovtcev@rambler.ru

Пиндюрин Валерий Федорович, ведущий научный сотрудник Института ядерной физики им. Будкера СО РАН. Основное направление исследований – использование синхротронного излучения, визуализация рентгеновских изображений, детекторы рентгеновского и ВУФ излучения. Имеет 59 публикаций. E-mail: V.F.Pindyurin@inp.nsk.su

Солдатов Артем Евгеньевич, аспирант Института ядерной физики им. Будкера СО РАН. Основное направление исследований – использование синхротронного излучения, рефлектометрия, детекторы рентгеновского и ВУФ излучения. Имеет 1 публикацию. E-mail: solartem@211.ru.

O.P. Korobeynichev, A.D. Nikolenko, A.G. Shmakov, I.E. Gerasimov, A.M. Dmitriev, S.A. Yakimjv, D.A. Knyazkov, L.V. Kuybida, P.S. Zavertkin, D.V. Ivlyushkin, M.R. Mashkovtsev, V.F. Pindyurin, S.E. Soldatov

Project of the VUV-range synchrotron radiation station for the flame diagnosis

The paper described the project of the synchrotron radiation station, which will allow to carry out the of fundamental research of flame, including the kinetics and mechanism of chemical reactions in the flame at the level of elementary stages, and the mechanism as well kinetics of the reactions in the thermal decomposition of condensed substances. The principle of operation of the station is based on the mass spectrometric analysis of the intermediate products of combustion which selected from a variety of regions of the flame. The ionization of the studied products for its analysis is done using synchrotron radiation (SR) VUV (5-20 eV photon energy). The station based on the ultra-high vacuum beamline with differential pumping system. Optical scheme of the station includes the plane grating monochromator. The paper briefly describes the basic parameters of the station, its optical scheme, layout of the beamline and analyzer equipment. The proposed station will be the only one in Russia and one of only three in the world.

Key words: synchrotron radiation, diffraction grating, ultrahigh vacuum installation, VUV, molecular beams, mass spectrometry, flame structure, mechanism of chemical reactions.