

УДК [535.371+536.526].001.5

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ OH-PLIF-ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРЕНИЯ МНОГОФАЗНЫХ СИСТЕМ (ОБЗОР)

Т. Д. Хэдман, К. Ю. Чо, М. А. Пфайль, А. Сатийя, Х. К. Монгия,
Л. Дж. Гровен, Р. П. Лухт, С. Ф. Сон

Университет Пердью, 47906 Уэст Лафайетт, Индиана, США, trevor.hedman@navy.mil

Современная высокоскоростная оптическая диагностика, а также новейшие методы визуализации позволяют исследовать высокодинамичные процессы горения в многофазных реакционных системах. В обзор включены самые последние работы по применению в этих целях высокоскоростной (5 кГц) плоскостной лазерно-индуцированной флюоресценции радикалов OH. Этот метод использовался для визуализации динамических изменений концентрации OH в газовой фазе вблизи поверхности твердых, жидких и гелеобразных топлив. Обнаружено, что помимо флюоресценции OH в газовой фазе под действием лазерного излучения на длине волны 283.2 нм также флюоресцирует конденсированная фаза этих топлив. Одновременная визуализация сигналов флюоресценции радикалов OH в газовой фазе и компонентов конденсированной фазы позволяет проводить различные исследования, ряд примеров представлен в обзоре.

Ключевые слова: плоскостная лазерно-индуцированная флюоресценция, многофазное горение, композитное топливо, капля горючего, гелеобразное горючее.

DOI 10.15372/FGV20160101

ВВЕДЕНИЕ

Метод лазерно-индуцированной флюоресценции (LIF) основан на том, что частота лазерного излучения настроена на определенный электронный (электронно-колебательно-вращательный) переход молекул. При поглощении фотонов лазерного излучения молекулы переходят в электронно-возбужденное состояние, часть из них переходит в состояние с более низкой энергией, это сопровождается излучением фотонов. Испускаемое молекулами излучение регистрируется, и по полученной интенсивности сигнала LIF, сделав некоторые предположения, можно определить концентрацию этих молекул. Плоскостная лазерно-индуцированная флюоресценция (PLIF) — это двумерный вариант метода LIF. Впервые он был реализован в Стэнфордском университете и компанией SRI International [1–3]. Границы применения метода PLIF постоянно расширяются. Метод широко используется для визуализации течений и определения концентраций соединений в различных процессах, в том чис-

ле происходящих при горении в газовых турбинах, двигателях внутреннего сгорания, при горении ракетных топлив. Как правило, метод PLIF применяется для исследования газовых систем и для контроля смешения компонентов топлива в процессе горения [4]. Одновременная визуализация конденсированной и газовой фаз этим методом ранее не проводилась.

Временное разрешение метода PLIF определяется длительностью лазерного импульса. Обычно в системах PLIF применяются Nd:YAG-лазеры с импульсной лампой накачки, используемые, в свою очередь, для накачки перестраиваемого лазера на красителе. Это позволяет достичь высокого временного разрешения с длительностью импульсов порядка нескольких наносекунд. Однако такого рода системы имеют малую частоту импульсов (10 ÷ 20 Гц), что делает довольно низкой скорость сбора данных. Это существенно ограничивает применимость метода PLIF для изучения переходных явлений при горении, в том числе в многофазных реагирующих системах. Совершенствование технологий полупроводниковых (диодных) лазеров сделало возможным создание Nd:YAG-лазеров с диодной накачкой, обеспечивающих высокую частоту импульсов. Хотя энергия импульса таких Nd:YAG-лазеров существенно ниже, их тем не менее можно ис-

© Hedman T. D., Cho K. Y., Pfeil M. A., Satija A., Mongia H. C., Groven L. J., Lucht R. P., Son S. F., 2016.

School of Mechanical Engineering, Purdue University, 47906 West Lafayette, Indiana, USA.

пользовать для накачки специально модифицированных лазеров на красителях и получать требуемую выходную мощность излучения в видимом и ультрафиолетовом (за счет удвоения частоты) спектральных диапазонах. Это позволяет существенно повысить скорость сбора данных при проведении PLIF-измерений и открывает возможности для исследования быстропротекающих процессов в реагирующих системах, таких как формирование турбулентности и ядра факела [5, 6], по крайней мере в потоках с низким числом Рейнольдса.

Помимо того, что метод PLIF, имеющий высокую скорость сбора данных, обычно применяется для зондирования газовой фазы, он также используется для визуализации течений, что достигается путем регистрации сигнала рассеянной флюоресценции частиц жидкости и сажи [7, 8]. Так, например, в работах [9, 10] методом PLIF изучали расходование горючего и характеристики поля течения в двигателе с искровым зажиганием. Для визуализации течения использовались капли жидкого этанола в потоке, которые, как известно, флюоресцируют под действием УФ-излучения. В работе [11] высокоскоростной метод PLIF применялся в комбинации с методом PIV (метод измерения скоростей потока по изображениям частиц) для визуализации факела горючего, состоящего из смеси пропан — аргон. Путем применения двух лазерных систем и двух отдельных систем визуализации с разнесенными во времени импульсами были визуализированы относительная концентрация ОН в газовой фазе и рассеянное излучение от частиц диоксида титана.

Цель данной работы — показать, что высокоскоростной метод PLIF может применяться для исследования различных многофазных систем, а именно для одновременного изучения газовой и конденсированной фаз. Представлены уникальные данные, полученные при одновременной регистрации сигналов газовой и конденсированной фаз. Обсуждаются преимущества и ограничения высокоскоростного метода PLIF.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Высокоскоростная PLIF-система

Описываемая ниже экспериментальная установка использовалась во всех обсужда-

емых работах. Применялся лазер на красителе Sirah Credo (CREDO-DYE) с накачкой твердотельным Nd:YAG-лазером Edgewave (IS811-DZ). Лазер Edgewave работал на второй гармонике с длиной волны 532 нм, длительность импульсов излучения 7.8 нс, мощность излучения 6 мДж/имп при частоте импульсов 5 кГц. В качестве усиливающей среды лазера на красителе Sirah Credo служил раствор родамина 590 в этаноле, который циркулировал через генератор и усилитель. Вследствие высокой частоты импульсов и высокой средней мощности накачивающего излучения родамин подвержен быстрому фотообесцвечиванию. Чтобы не допустить этого, использовались высокопроизводительные насосы, обеспечивающие циркуляцию 4 л красителя через кюветы. Концентрация красителя в генераторе и усилителе составляла соответственно 0.135 и 0.09 г/л. Охлаждение красителя осуществлялось во внешнем теплообменнике (HALCO Products Company, 76607P), через который циркулировала охлаждающая вода со скоростью 13.25 л/мин. Выходящий из усилителя луч имел длину волны 566.44 нм и фокусировался на кристалле для удвоения частоты.

Для выделения луча с удвоенной частотой применялся четырехпризмный фильтр. Энергия луча на выходе из лазера на красителе, измеряемая измерителем мощности Coherent FieldMaxII-TO, составляла 0.4 мДж/имп или 2.0 Вт при 5 кГц. Длина волны лазера была настроена на возбуждение линии $Q_1(7)$ перехода $A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi(1,0)$ вблизи 283.2 нм и измерялась измерителем High Finesse WS6 Precision, расположенным на пути основного луча. По расчетам длина волны луча на выходе из лазера на красителях составляла 283.22 нм. Этот луч был вертикально поляризован и имел размеры 0.8 мм по горизонтали и 2 мм по вертикали.

Луч лазера расширялся как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении с помощью отрицательных сферических линз ($f = -75$ мм, чистая апертура (С.А.) = 21.3 мм). Поскольку высота луча была больше ширины, для дополнительного его расширения в горизонтальном направлении использовалась отрицательная цилиндрическая линза ($f = 50$ мм, С.А. = 21.3 мм). Для фокусировки расходящегося луча применялась положительная сферическая линза ($f = 500$ мм, С.А. = 50.0 мм).

Такая оптическая конфигурация позволяла получить хорошо коллимированный луч круглого поперечного сечения диаметром ≈ 5 см. Луч лазера разворачивался в «нож» с помощью положительной цилиндрической линзы квадратной формы ($f = 250$ мм, С.А. = 43.2×43.2 мм). Высота лазерного ножа была 5.1 см, минимальная толщина 50 мкм в узкой части (перетяжке).

Из-за короткого фокусного расстояния цилиндрической линзы необходимо было обеспечивать положение центра области измерения вблизи перетяжки луча. Толщину лазерного ножа определяли путем измерения профилей прожига углеродной бумаги на различных расстояниях от перетяжки луча в измерительной зоне.

Регистрация сигнала флюоресценции ОН осуществлялась с помощью УФ-объектива производства UKA Optics (UV1054B 105mm F/4.0 Quartz Lens) и интерференционного фильтра (FF01-320/40-25) с пропусканием 74 % на длине волны 310 нм. Интерференционный фильтр позволял избавиться от паразитного рассеянного возбуждающего излучения лазера и пропускать только сигнал флюоресценции на длинах волн вблизи 310 нм. Объектив был установлен на высокоскоростном электронно-оптическом преобразователе Video Scope International (VS4-1845HS). Максимальная рабочая частота преобразователя 100 кГц, максимальный коэффициент усиления 80 000. Размер области, в которую УФ-объектив фокусировал излучение флюоресценции, составлял 18 мм. Электронно-оптический преобразователь с фотокатодом S-20 (содержащим натрий, калий, сурьму и цезий) обеспечивал квантовую эффективность ≈ 30 % при двухступенчатом усилении на длине волны 310 нм. Усиленный оптический сигнал преобразовывался с помощью люминофора P46 ($Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$), спектр излучения которого имеет максимум длины волны в зеленой области (вблизи 530 нм).

На выходе из преобразователя излучение на длине волны 530 нм регистрировалось высокоскоростной камерой Vision Research Phantom 7.3 (6 688 кадр/с) с максимально возможным разрешением и глубиной 16 бит. Изображения регистрировались с помощью КМОП-детектора 800×600 с размером пикселя 22 мкм и динамическим диапазоном 60 дБ. Система регистрации сигнала флюоресценции располагалась перпендикулярно направлению распро-

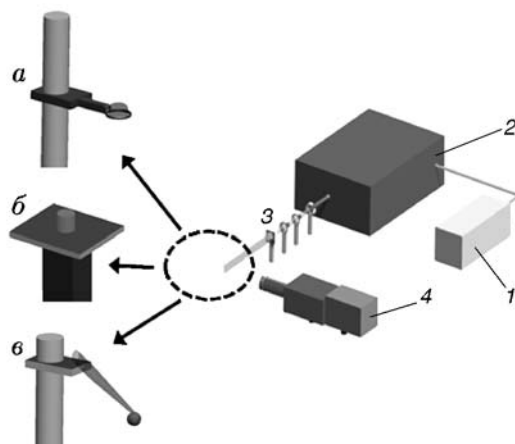


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для проведения высокоскоростных измерений методом PLIF при исследовании капель гелеобразного топлива, удерживаемых с помощью проволоочной петли (а), твердого топлива (б) и каплей жидкого топлива, подвешенных на кварцевом стержне (в):

1 — лазер накачки, 2 — лазер на красителе, 3 — оптическая система, 4 — система регистрации излучения

странения лазерного излучения и перпендикулярно плоскости лазерного ножа.

Высокоскоростная PLIF-система применялась для исследования твердых, гелеобразных и жидких топлив. На рис. 1 показаны три способа размещения исследуемых образцов различных топлив: капля гелеобразного горючего удерживается с помощью проволоочной петли (а), образец твердого топлива размещен на стальной пластине (б), капля жидкого горючего подвешена на конце кварцевого стержня (в).

Приготовление образцов композитного топлива

Композитное твердое топливо представляет собой тщательно перемешанные горючее, окислитель и связующее. Последнее обеспечивает топливу требуемые механические свойства. В качестве окислителя в твердых топливах обычно используется перхлорат аммония (ПХА). Он получил широкое распространение благодаря высокой эффективности, а также тому, что путем варьирования размера кристаллов ПХА можно подобрать необходимую скорость горения топлива [12]. В твердых топливах диаметр частиц ПХА обычно составляет несколько сотен микрометров или меньше, поэтому частицы успевают полностью проре-

агировать за доли секунды. По этим причинам структура пламен с ПХА в качестве окислителя была предметом многих исследований, включая работы по изучению диффузионных пламен в противотоке [13] и пламен сэндвич-структур [14]. Высокоскоростной метод PLIF позволяет наблюдать процесс горения отдельных частиц ПХА in-situ [15].

Образцы композитного топлива содержали 80 % (по массе) бимодального ПХА с соотношением крупной и мелкой фракций, равным 1. Крупная фракция состояла из частиц номинальным диаметром 400 мкм, мелкая — 20 мкм. Распределение частиц ПХА по размеру соответствует приведенному в работе [15].

В качестве связующего использовался полибутадиен с концевыми гидроксильными группами (НТРВ) с добавлением небольшого количества отвердителя и пластификатора. Связующее составляло 20 % от полной массы топлива.

Образцы топлива на основе ПХА/НТРВ изготавливались в виде цилиндров диаметром 6.35 мм и высотой ≈ 10 мм в соответствии с описанной в работе [15] процедурой.

Приготовление образцов гелеобразного топлива

Гелеобразное горючее готовилось путем добавления гелеобразующего компонента в жидкое горючее. В качестве гелеобразующего компонента использовалась гидроксипропилцеллюлоза, в качестве жидкого горючего — метанол и монометилгидразин. Жидкости горючих смешивались в различном массовом соотношении с гелеобразующим агентом. Обнаружено, что гидроксипропилцеллюлоза (Klucel®) растворяется как в метаноле, так и в монометилгидразине. Процедура приготовления образцов гелеобразных топлив детально описана в работе [16].

Благодаря высокой вязкости таких топлив, энергетические частицы в них образуют взвеси, потенциально увеличивающие энергию [17]. За счет упруговязких свойств значительно снижается опасность их случайного пролива, разбрызгивания и смешения с другими материалами. Несмотря на то, что интерес к исследованию гелеобразных топлив проявляется начиная с 1960-х годов и запатентованы самые различные их составы, в [18] сообщается, что не обнаружено данных об их использовании в качестве ракетных топлив.

Для применения гелеобразных топлив в качестве ракетных необходимо решить следующие задачи: обеспечить безопасность при обращении с ними, распыление в камере сгорания и эффективность горения. Сравнение процессов горения капель жидкого и гелеобразного горючего позволит лучше понять работу ракетного двигателя на гелеобразном топливе [19]. Ранее для измерения скорости горения капли геля и наблюдения за изменением поверхности горения применялись высокоскоростные камеры [20]. Установлено, что на поверхности капли геля образуется слой несгоревшего гелеобразующего компонента [21]. По мере того как этот слой растет, выход паров разложившегося горючего через него затрудняется, в результате чего создается локальная область высокого давления на поверхности капли. Как только давление в этой области превышает предел текучести слоя, на капле происходит микровзрыв и формируются высокоскоростные струи паров. Эти струи возникают всего на несколько миллисекунд, создавая чрезвычайно неустойчивое несимметричное пламя. Высокоскоростная PLIF-система позволяет вести наблюдение за поверхностью капли и за структурой пламени. С ее помощью были определены скорость, угол и частота возникновения струй паров горючего.

Приготовление образцов жидкого топлива

В реальных системах, где применяется горение жидких топлив, часто используются топливные присадки с целью подавления неустойчивости горения и образования загрязняющих веществ. Однако эти присадки изменяют структуру пламени и сам процесс горения. Недавно методом PLIF было изучено влияние присадок борана аммиака и наноалюминия на горение этанола и авиационного керосина JP-8 [22]. Выбор борана аммиака обусловлен высоким содержанием водорода в его молекуле, а наноалюминий выбран благодаря высокому энергосодержанию и малому размеру частиц, которые могут быть суспензированы в жидкости.

В данной работе исследовались два вида жидких горючих смесей. Одна из них изготавливалась путем растворения борана аммиака в безводном этаноле в различных пропорциях, вплоть до 6 % борана аммиака. Другая смесь состояла из керосина JP-8, наноалюминия (Novacentrix, 80 нм, логарифмически

нормальное распределение со средним диаметром частиц 79 нм [23]) и поверхностно-активной добавкой Neodol. Эксперименты проводились с каплями смесей следующего состава: наноалюминий/Neodol/JP-8 = 1/3/96 % и Neodol/JP-8 = 3/97 %. Перед началом экспериментов составы перемешивались с помощью ультразвукового смесителя Branson Sonicator (102 CE). Капли как жидкого, так и гелеобразного горючего во время эксперимента были приблизительно сферической формы диаметром в несколько миллиметров.

Обработка изображений OH-PLIF

Для определения изменения интенсивности излучения в различных точках лазерного ножа проводились специальные PLIF-измерения в зоне пламени с постоянной концентрацией OH. Ранее в работе [24] было показано, что в водородовоздушном пламени, стабилизированном на горелке Хенкена, на расстояниях $2 \div 4$ см от горелки концентрация OH практически не изменяется. Газообразное горючее в такой горелке подается через медицинские иглы, концы которых немного выступают над поверхностью горелки. Окислитель подается в пространство между иглами, а горелка обдувается спутным потоком азота. Горючее и окислитель смешиваются в пространстве над горелкой и формируют пламя в условиях, близких к адиабатическим. Фотография пламени этой горелки приведена на рис. 2, *а*. По аналогии с тем, как это было сделано в работе [24],

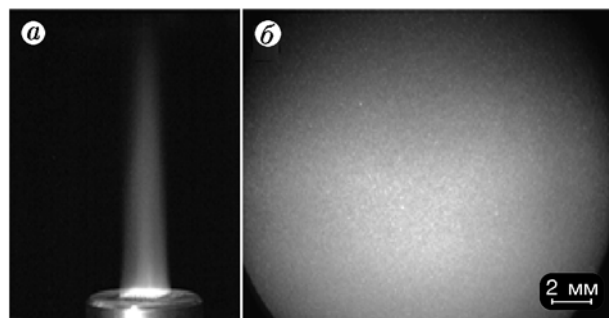


Рис. 2. Фотография пламени на горелке Хенкена (*а*). Изображение области постоянной концентрации OH ($2 \div 4$ см) над горелкой Хенкена, полученное с помощью PLIF-системы (*б*):

а — горючее подается в область размером 2×2 см, окруженную спутным потоком азота

нами были получены карты интенсивности лазерного излучения в пределах измерительной области. Горелка закреплялась на телескопическом столике, что позволяло устанавливать ее на необходимой высоте. На вход горелки подавались воздух и водород, а в качестве обдувающего газа использовался азот. Расходы водорода и воздуха задавались регуляторами KS (модель 247D) и были равны соответственно 25.45 и 60.6 л/мин, что обеспечивало стехиометрическую смесь. После настройки лазерного ножа на область постоянного сигнала флуоресценции были получены изображения профиля интенсивности ножа. На рис. 2, *б* приведена фотография области постоянной концентрации OH над горелкой Хенкена, сделанная с помощью высокоскоростной PLIF-системы.

Благодаря тому, что горелка Хенкена обеспечивает постоянную концентрацию OH в определенной области, можно установить изменение интенсивности лазерного ножа в различных его точках. Точная настройка кристалла удвоения частоты в лазере на красителе Credo позволила получить постоянный сигнал OH по высоте лазерного ножа. Однако горизонтальные изменения вдоль направления лазерного излучения всё же остались из-за поглощения энергии в водородовоздушном пламени и составили примерно 4 % на 1 см. Частично это может быть связано с тушением флуоресценции, что будет обсуждаться ниже. Конечно, изменение сигнала в направлении распространения лазерного излучения зависит от плотности газа в области измерения, что необходимо принимать во внимание.

Если измеряемая область была больших размеров, то, используя изображения, полученные над горелкой Хенкена, делали соответствующие поправки на то, что интенсивность излучения различна в разных точках лазерного ножа. Ввиду наличия краевых эффектов на горелке, такие поправки можно сделать в области площадью ≈ 2.25 см². Изображения, аналогичные приведенному на рис. 2, *б*, использовались для корректировки профиля интенсивности лазерного ножа при обработке экспериментальных результатов. Предполагалось, что сигнал флуоресценции OH пропорционален энергии лазерного излучения, а среда, определяющая тушение флуоресценции OH, в изучаемых системах аналогична той, что имеет место над горелкой Хенкена.

Разрешение PLIF-системы

Временное разрешение метода PLIF определяется длительностью лазерного импульса. Использовался осциллограф Tektronix (DPO5034), который регистрировал сигнал с фотодиода, принимающего излучение с оптоволоконного кабеля, ориентированного на прием излучения основного луча. Измеренная длительность импульса составила 7.8 нс (полная ширина на половине высоты), интервал между импульсами — 0.2 мс, что соответствует частоте импульсов 5 кГц. Эти параметры поддерживались неизменными во всех экспериментах.

Пространственное разрешение PLIF-системы в направлении, параллельном оси визуализации, определялось толщиной лазерного ножа. Изменяя положение объектива оптической системы, толщину лазерного ножа в перетяжке можно было варьировать в пределах $50 \div 800$ мкм. В плоскости лазерного ножа пространственное разрешение PLIF-системы определялось настройками УФ-объектива. Для повышения увеличения системы регистрации излучения применялись удлинительные кольца и сильфоны. Измерения показали, что пространственное разрешение системы, состоящей из камеры, электронно-оптического преобразователя, объектива, составляло $18 \div 60$ мкм/пиксель в зависимости от настроек объектива.

Усиление, при котором работает система, состоящая из электронно-оптического преобразователя и КМОП-детектора, очень велико, поэтому данная система способна воспринимать космическое излучение. Точную величину шума вычислить довольно сложно, но к основным его источникам следует отнести собственные шумы КМОП-детектора, шумы фотоумножителя/фотокатода электронно-оптического преобразователя и случайно усиленный сигнал от космического излучения. Помимо этого, регистрировался шум в виде ярких круглых пятен, возникающих в произвольных точках на изображениях длительностью в один кадр. В работе [21] пришли к заключению, что для обеспечения приемлемой погрешности необходимо проводить измерения в пламенах размером более 100 мкм.

Варьирование толщины лазерного ножа

Толщина лазерного ножа в перетяжке ва-

рьировалась в данной работе от 50 до 800 мкм посредством изменения расстояния между рассеивающими линзами. Для большего увеличения этой толщины вместо линзы с фокусным расстоянием 250 мм применялась цилиндрическая линза ($f = 500$ мм, С.А. = 50 мм). Толщину лазерного ножа выбирали, исходя из величины сигнала ОН конкретного образца и размера измерительной области. Необходимо следить за тем, чтобы луч был хорошо коллимирован в измерительной области. Для каждого случая размеры измерительной области определяли с помощью высокоскоростной съемки. Толщину лазерного ножа на различных расстояниях от перетяжки находили по размеру следа прожига углеродной бумаги. Чем тоньше лазерный нож, тем короче рэлеевская длина, или длина коллимации, поэтому оптимальную толщину ножа выбирали, исходя из величины измерительной области, индивидуально для каждой исследуемой системы.

При выборе толщины лазерного ножа необходимо также учитывать концентрацию ОН в газовой фазе. При слишком низкой концентрации ОН для получения сигнала достаточной интенсивности необходимы измерительная область больших размеров и задание настроек, повышающих чувствительность системы. При насыщении возбуждаемого перехода уровень сигнала ОН линейно растет с увеличением толщины лазерного ножа. Для исследования горения образцов твердых топлив определялся средний уровень сигнала непосредственно над центральной частью поверхности топлива при различных толщинах лазерного ножа. Осреднение выполнялось в обла-

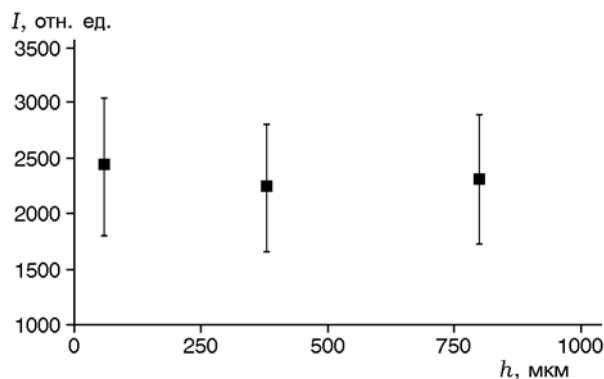


Рис. 3. Зависимость осредненного сигнала ОН флюоресценции над образцом твердого топлива ПХА/НТРВ от толщины лазерного ножа

сти 2×2 мм через 1 с после начала устойчивого горения. Измеренные нами в экспериментах уровни сигнала при энергии импульса 0.36 мДж приведены на рис. 3. Следует отметить, что сигнал не увеличивался с ростом толщины лазерного ножа. Это свидетельствует о том, что переход $Q_1(7)$ сигнала флюоресценции ОН не насыщен. Для систем, горение в газовой фазе которых изучалось в данной работе, толщина лазерного ножа выбрана в пределах $50 \div 60$ мкм. При ее выборе исходили из размера исследуемого образца. Установлено, что использование тонкого ножа (толщиной 200 мкм или меньше) дает наилучшие результаты при исследовании малых капель и кристаллов твердых топлив.

Кроме того, обнаружено, что широкий сигнал флюоресценции конденсированной фазы изученных в данной работе систем не изменяется пропорционально толщине лазерного ножа. По-видимому, это связано с тем, что исследуемые кристаллы, капли геля и жидкости были большего размера, чем толщина ножа, и на них происходило значительное рассеяние излучения. Поэтому уменьшение толщины лазерного ножа не приводило к изменению энергии, поглощенной конденсированной фазой. По этой причине изменение контраста между сигналами конденсированной и газовой фаз представляло собой определенную трудность. Увеличение энергии в импульсе до точки насыщения перехода позволило получить более контрастную картину, поскольку варьированием толщины ножа можно добиться увеличения сигнала от газовой фазы и при этом незначительно изменить сигнал от конденсированной фазы.

Настройка длины волны

При исследовании многофазных систем особую роль для правильной интерпретации результатов играет настройка на резонанс и отстройка от него. Настраивая длину волны диагностического луча, можно разделить вклады сигналов от газовой и от конденсированной фаз. Наиболее интенсивные переходы в молекуле ОН возбуждаются лазерным излучением с длиной волны 283.2 нм, при этом электроны переходят из основного состояния $X^2\Pi$ в возбужденное $A^2\Sigma$. Для более точной настройки длины волны возбуждающего излучения можно выбрать различные вращательные уровни энергии. Как уже говорилось, в этой работе

выбран переход $Q_1(7)$ радикала ОН путем настройки лазера на длину волны ≈ 283.2 нм.

Сигнал флюоресценции конденсированной фазы кристаллов, гелей и жидкостей регистрировался с использованием интерференционного фильтра на длине волны около 310 нм, где его интенсивность достаточно велика, одновременно с сигналом, пропорциональным относительной концентрации ОН. В некоторых случаях это затрудняло интерпретацию полученных с помощью PLIF-системы изображений, поскольку источник происхождения измеренного сигнала точно не известен. Чтобы разделить вклады от сигнала радикалов ОН из газовой фазы и сигнала флюоресценции частиц конденсированной фазы, проводили сканирование по ближайшим длинам волн при одновременной записи сигнала ОН. В работе [15] обнаружено, что на длине волны ≈ 283.1 нм возбуждения ОН в газовой фазе практически не происходило, при этом сигнал флюоресценции конденсированной фазы оставался неизменным. Записывая изображения вблизи 283.2 и 283.1 нм, можно определить источник измеренного сигнала, т. е. газовая это или конденсированная фаза.

В качестве примера применимости описанного метода отстройки лазера на рис. 4 показаны изображения, полученные в работе [15] при горении твердого топлива. На рис. 4, *а* лазер настроен на возбуждение перехода $Q_1(7)$ радикала ОН вблизи 283.2 нм. Видно, что вместе с сигналом ОН в газовой фазе наблюдаются яркие круглые области на поверхности топлива, которые соответствуют кристаллам твердого окислителя. На рис. 4, *б* показано изобра-

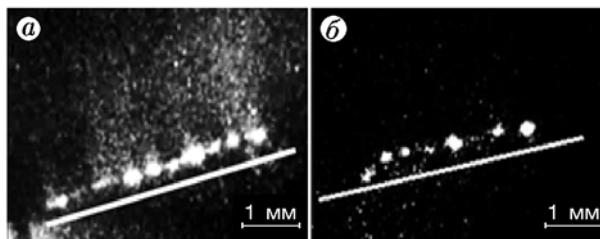


Рис. 4. Фотографии процесса горения композитного твердого топлива, полученные с помощью высокоскоростной PLIF-системы (из работы [15]):

а — снимок получен при настройке длины волны лазерного излучения на переход $Q_1(7)$ радикала ОН (283.2 нм), *б* — при длине волны лазера 283.1 нм, светлые линии — положение поверхности горения

жение той же самой системы, но полученное при настройке лазера на длину волны 283.1 нм, при которой флюоресценция ОН практически не возбуждается. Следует сказать, что изображения на рис. 4 соответствуют двум различным образцам твердого топлива ПХА/НТРВ. При записи изображений конденсированной фазы необходимо, чтобы вклад в сигнал от рэлеевского рассеяния или лазерного отражения был минимальным. Из сопоставления измерений, полученных при настройке на резонанс ОН и отстройки от него, можно определить сигнал флюоресценции в газовой фазе. Такой подход использовался при исследовании всех описанных выше систем и позволял разделить сигналы газовой и конденсированной фаз.

Ограничения метода

Ниже будут продемонстрированы достоинства применения метода PLIF к многофазным системам. Здесь отметим его недостатки. Прежде всего, эффективность преобразования УФ-излучения лазера на красителе, показанного на рис. 1, низка на длинах волн вне интервала $250 \div 300$ нм. Это серьезно ограничивает количество соединений, которые можно регистрировать высокоскоростной LIF-системой. Фактически, до настоящего момента радикал ОН — это единственное регистрируемое промежуточное соединение. Отчасти это ограничение обусловлено самим методом LIF, так как частиц, которые флюоресцируют с достаточно высокой интенсивностью, очень мало, к ним можно отнести ОН, NH, СН и CN. Сигнал лазерно-индуцированной флюоресценции промежуточных частиц с большим количеством атомов, играющих важную роль в процессе горения топлив, таких как гидроксипропилцеллюлоза, крайне трудно измерить.

Кроме того, при использовании PLIF-системы трудно извлечь из полученного для таких частиц сигнала количественную информацию. С одной стороны, это связано со столкновительным тушением возбужденных частиц. С другой стороны, количество излучения индуцированной флюоресценции, достигающее детектора, зависит от состава газовой среды, в которой находится лазерный нож. Например, излучение индуцированной флюоресценции на пути в детектор может быть перепоглощено аналогичными соединениями. Наконец, хемилюминесценция и люминесценция в пламени

могут также давать вклад в измеряемый сигнал. Один из подходов по уменьшению влияния люминесценции в пламени состоит в установлении очень короткой длительности стробирующего импульса для детектора, обычно это менее 100 нс. Для каждой исследуемой системы необходимо тщательно контролировать уровень сигнала хемилюминесценции, особенно при высоком давлении, поскольку она дает существенное уширение линий.

Еще один недостаток метода PLIF состоит в следующем. В случае твердых топлив сигнал хемилюминесценции измеряется при разных давлениях. При повышенном давлении использовалась система PLIF с камерой сгорания, оснащенной тремя окнами диаметром 6 см, изготовленными из плавящего кварца: для входа и выхода лазерного излучения, а также для измерения индуцированного излучения. Образцы поджигали с помощью петли из нихромовой проволоки. Давление внутри камеры во время эксперимента создавалось нагнетанием азота. Для определения вклада сигнала ОН* на длине волны 310 нм лазер был выключен, но при этом проводилась регистрация сигнала. Для исследуемых в данной работе образцов твердого топлива сигнал ОН* представлял собой «облако» с центром на образце, наибольшая его интенсивность наблюдалась на расстоянии $1 \div 3$ мм от поверхности. Это согласуется с наблюдениями авторов работы [25], изучавших сигнал LIF и излучение ОН над образцом смесового топлива на основе ПХА. Для каждого образца топлива осредненный сигнал определялся в зависимости от давления. Осреднение проводилось по квадратной области размером 10 000 пикселей на расстоянии примерно $1 \div 3$ мм от поверхности образца, использовалось несколько изображений. Установлено, что средний уровень сигнала менялся не более чем на 20 % для одного образца при заданном давлении. Результаты выполненных нами измерений приведены на рис. 5. Отслеживать сигнал LIF из газовой фазы становится сложнее с ростом вклада хемилюминесценции, что ограничивает применение высокоскоростного метода PLIF при повышенном давлении.

Из-за этих ограничений приведенные в данной работе результаты PLIF-измерений в многофазных системах содержат информацию только об относительной концентрации ОН. До сих пор не предпринимались попытки определить абсолютную концентрацию ОН. Кроме

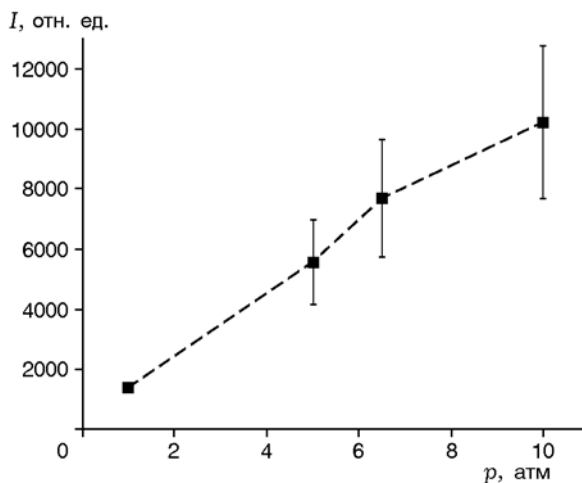


Рис. 5. Интенсивность сигнала хемилюминесценции исследуемых образцов твердого топлива

того, если вклад хемилюминесценции большой, то можно говорить только о характере изменения полного измеренного сигнала LIF. Для возбуждения с помощью системы PLIF был выбран переход $Q_1(7)$ радикала OH, поскольку интенсивность этого радикала относительно слабо зависит от температуры и он, как было показано, служит хорошим маркером пламени. Хотя из полученных изображений трудно извлечь количественную информацию, они позволяют понять быстропротекающие процессы, наблюдая за относительной концентрацией OH.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ PLIF-ИЗОБРАЖЕНИЙ

Высокоскоростным методом PLIF исследованы следующие многофазные системы: композитные топлива на основе ПХА [15, 26, 27], гелеобразные метанол и монометилгидразин [16], а также жидкие топлива с добавками [22]. Регистрация сигнала флюоресценции компонентов конденсированной фазы одновременно с полем относительной концентрации OH в газовой фазе позволила изучить взаимное влияние поверхности конденсированной фазы и концентрации OH в газовой фазе и получить уникальные результаты по горению вышеуказанных видов топлива.

Твердые топлива

Установлено, что при воздействии лазерного излучения с длиной волны вблизи 283 нм

на образцы композитных топлив флюоресцирует крупная фракция кристаллов ПХА. Это дает возможность отличить их на поверхности образцов от других компонентов смеси — мелкой фракции и полимерного связующего. На рис. 4 видны крупные кристаллы ПХА, выступающие над поверхностью горения. Как сообщалось в работах [28, 29], это характерно для топлив на основе ПХА при низком давлении. Визуализация процесса горения образцов топлива проводилась под действием возбуждающего лазерного излучения с длиной волны, настроенной на переход $Q_1(7)$ радикала OH (283.2 нм) и с отстройкой от него. Были отдельно визуализированы изображения только частиц ПХА и частиц ПХА совместно с сигналом OH из газовой фазы, как показано на рис. 3. Другими словами, меняя длину волны лазерного излучения, можно добиться правильной интерпретации полученных изображений и исследовать взаимовлияние газовой и конденсированной фаз. Таким образом, высокоскоростной метод PLIF может широко применяться для исследования процессов на поверхности композитных топлив на основе ПХА [15].

При давлении ниже 5 атм воспламенение отдельных частиц ПХА с последующим горением происходит с некоторой задержкой. Вначале на частицу ПХА воздействуют горячие газы на поверхности, поскольку смесь вокруг нее, состоящая из мелкой фракции ПХА и связующего, быстро сгорает. Крупные кристаллы ПХА остаются на поверхности, при этом их размер практически не меняется. Через некоторое время частица начинает уменьшаться и вокруг нее появляется область относительно высокой концентрации OH, свидетельствующая о воспламенении. Этот процесс иллюстрирует рис. 6 из работы [15], на котором показано горение отдельного кристалла ПХА. На рис. 6,а поверхность слегка подсвечена мелкой фракцией ПХА. На рис. 6,б виден кристалл ПХА диаметром 350 мкм, а вокруг него в газовой фазе очень слабый сигнал OH. Это означает задержку воспламенения частицы. На рис. 6,в зафиксировано начало формирования области высокой относительной концентрации OH через 128 мс после того, как был сделан снимок, приведенный на рис. 6,а. На рис. 6,г,д показан процесс сгорания кристалла ПХА. Этот вывод сделан на основании того, что на этих изображениях сигнал OH интенсивный, а диаметр частицы уменьшился. Наконец, на рис. 6,е

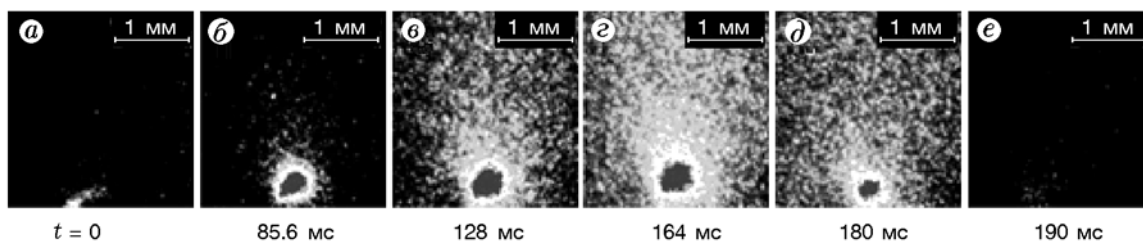


Рис. 6. Процесс горения частицы исходного размера 350 мкм (из работы [15]): снимки обработаны так, чтобы продемонстрировать наличие градиента ОН в газовой фазе

кристалл ПХА полностью сгорел и заметен лишь слабый сигнал ОН в газовой фазе. На рис. 6, б, г видно, что сигнал исходит изнутри частицы, по-видимому, это связано с искажениями электронно-оптического преобразователя.

PLIF-изображения позволили установить такие параметры горения частиц ПХА, как время задержки воспламенения, длительность горения и максимальная высота пламени над частицей, при различных начальных размерах частиц и различном давлении [27]. Получены уникальные данные о высоте пламени над отдельной частицей ПХА. Они необходимы для получения информации о влиянии тепла, выделяющегося в газовой фазе, на конденсированную фазу, а также о механизме горения композитного твердого топлива. Высота пламени определялась на основе результатов измерения размера области, где сигнал ОН в газовой фазе имел фиксированное значение, немного превышающее фоновое. По результатам измерения для образцов с различным номинальным размером частиц выявлены соответствующие закономерности для одиночной частицы ПХА при изменении ее диаметра. Подробное обсуждение полученных результатов и их значимости приведено в работе [15].

Для исследования топлив при повышенном давлении [27] также применялся высокоскоростной метод PLIF. Измерения проводились в камере сгорания высокого давления с окнами из плавящего кварца, обладающего высокой пропускной способностью в УФ-области. Поджиг осуществлялся с помощью петли из нихромовой проволоки, расположенной над образцом топлива. Существенный вклад хемиллюминесценции, образование твердого остатка при горении и темный дым при давлении свыше 12 атм ограничивают применимость этого метода диапазоном 1 ÷ 12 атм.

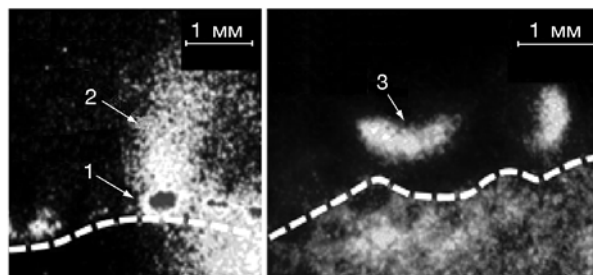


Рис. 7. Структура пламени твердого топлива ПХА/НТРВ при низком (3 атм, а) и повышенном (6 атм, б) давлениях (из работы [27]): штриховая линия — положение поверхности топлива, 1 — кристалл, 2 — струя, 3 — пламя

Установлено [27], что структура пламени существенно изменяется при давлении выше 5 атм. При низком давлении (1 ÷ 4 атм) она похожа на структуру длинного струйного диффузионного пламени (рис. 7, а). С ростом давления пламя начинает представлять собой поднятое, инвертированное (окислитель в центре) диффузионное пламя с избытком окислителя (рис. 7, б). Оно формируется по той причине, что крупные частицы ПХА с ростом давления горят намного быстрее, чем окружающая их среда, приводя к заглоблению частицы в поверхность, а не выходу из нее. Благодаря высокой объемной скорости выхода окисляющих газов, формируется поднятое, обогащенное окислителем пламя. Такие пламена, насколько известно авторам данной работы, не описываются современными моделями горения топлив на основе ПХА/НТРВ [27]. Это демонстрирует применимость метода высокоскоростной PLIF-визуализации для одновременного исследования газовой и конденсированной фаз.

Метод PLIF был успешно применен к многофазной системе, состоящей из твердого топлива и газовых продуктов его горения. Ценность проведенных измерений в том, что дан-

ные о концентрации ОН в газовой фазе получены одновременно с данными о поведении поверхности топлива, и это позволяет более глубоко понять процесс горения.

Гелеобразные топлива

Горение осуществлялось в камере объемом 4.5 л при постоянном давлении. Для удержания капли использовалось кварцевое кольцо внутреннего диаметра 1.9 мм и внешнего диаметра 3.2 мм. Капля гелеобразного горючего наносилась на кольцо, которое размещалось так, чтобы капля оказалась в центре лазерного ножа. На расстоянии ≈ 1 см ниже капли гелеобразного горючего помещали небольшую каплю метанола, которая удерживалась на петле из нихромовой проволоки, для формирования запального пламени.

В настоящей работе для визуализации горения капли гелеобразного топлива применялась PLIF-система. Обнаружено, что капли с гидроксипропилцеллюлозой в качестве гелеобразующего агента флюоресцируют при облучении лазером. Это дает возможность одновременно регистрировать сигнал из газовой фазы и определять размер капли в процессе горения. На рис. 8 показана последовательность снимков, полученных в работе [16] с помощью высокоскоростной системы ОН-PLIF-визуализации процесса горения геле-

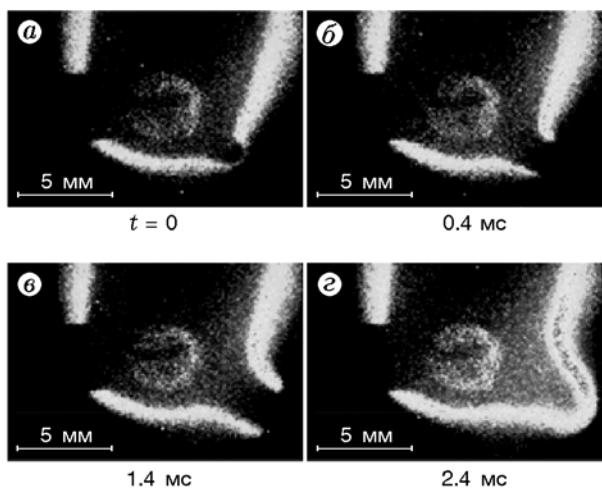


Рис. 8. Микровзрыв и интенсивная исходящая струя при горении гелеобразного метанола (3 % гидроксипропилцеллюлозы) при давлении 275.8 кПа, возмущающая факел пламени (из работы [16])

образного метанола. Наблюдаемый у поверхности геля сигнал флюоресценции радикалов ОН в газовой фазе свидетельствует о наличии практически симметричного факела диффузионного пламени. На рис. 8, *a* давление в капле геля метанол/гидроксипропилцеллюлоза, вероятно, достигло критического, и потому наблюдается выброс паров еще не вступившего в реакцию горючего, о чем свидетельствует небольшой разрыв факела в нижней правой части капли. На рис. 8, *b-g* на факеле диффузионного пламени виден разрыв, образованный выходящими парами горючего, затем факел снова восстанавливается вокруг капли геля. Хотя такие струи возникают и существуют менее 3 мс, частота их появления высока, поэтому они составляют важную часть процесса горения. Это приводит к тому, что распределение ОН вокруг капли сильно несимметрично, что должно обязательно учитываться при моделировании структуры пламени.

Одним из важных результатов исследования горения капель геля было то, что в некоторых случаях струи исходящих паров горючего были настолько сильными, что это приводило к погасанию диффузионного пламени. Кроме того, некоторые струи формировали собственное пламя, независимое от диффузионного пламени, окружающего каплю. Вероятно, это связано с тем, что струя состоит главным образом из паров горючего. В работе [16] выполнены количественные измерения углов и положений пламен этих струй при разных давлениях и концентрациях гелеобразующего агента. Установлено, что скорость струи уменьшается с ростом давления и увеличивается с повышением концентрации гелеобразующей присадки. Струи возникали повторно в тех же самых положениях, что свидетельствует об ослаблении поверхности после возникновения самой первой струи. Благодаря высокому временному разрешению, высокой скорости сбора данных, а также одновременной визуализации структуры пламени в газовой фазе и поведения поверхности, удалось получить информацию о микроструктуре пламени.

Аналогично, как и в случае композитных топлив на основе ПХА, в исследуемых нами гелеобразных топливах наблюдалась флюоресценция. Обнаружено, что гидроксипропилцеллюлоза флюоресцирует при облучении лазером на длине волны 283.2 нм. Это дало возможность одновременно визуализировать поверх-

ность капли и поле относительной концентрации ОН в газовой фазе. Важную роль в определении относительной концентрации ОН и скорости струй, которые изменяются в течение нескольких миллисекунд, сыграло высокое временное разрешение используемой установки. Визуализация конденсированной фазы позволила наблюдать разрывы в поверхностном слое капли во время формирования струй и установить их влияние на структуру пламени. Таким образом, метод PLIF, примененный к многофазной системе, снова показал свою состоятельность для исследования взаимодействий между поверхностью топлива и пламенем.

Однако, несмотря на все преимущества исследования конденсированной и газовой фаз методом ОН-PLIF, у него есть ряд недостатков. Поскольку гелевые флуоресцирует частично за счет населенности ОН в основном состоянии, разделить их вклады довольно трудно при изучении горения аэрозоля. Кроме того, капли геля частично поглощают энергию лазерного излучения, что может повлиять на скорость горения. Системой PLIF-визуализации также регистрируется сигнал, возникающий из-за рассеивания и отражения лазерного излучения поверхностью капли геля. Поэтому, чтобы вычлечь вклад сигнала из газовой фазы, необходимо проведение экспериментов с отстройкой возбуждающего излучения. Доказательством поглощения лазерного излучения является наличие темной области на профилях сигнала ОН с левой стороны на снимках, представленных на рис. 8.

Жидкие топлива

Сначала исследовалось горение капель чистого этанола и чистого керосина, затем в этанол вводился боран аммиака, а в керосин — наоалюминий [22]. Отдельные капли диаметром $2 \div 3$ мм подвешивались на тонких кварцевых стержнях с шариком диаметром $300 \div 500$ нм на конце. Кварцевые стержни размещались так, чтобы шарик на конце стержня располагался в центре лазерного ножа PLIF-системы. Капли на шарике стержня поджигались петлей из нихромовой проволоки или бутановой горелкой. Чтобы устранить колебания пламени капли, вызванные движением воздуха в помещении, где проводится эксперимент, при исследовании капель керосина JP-8 кварцевый стержень и каплю помещали внутрь большой кварцевой трубки. При этом трубка обеспечивала

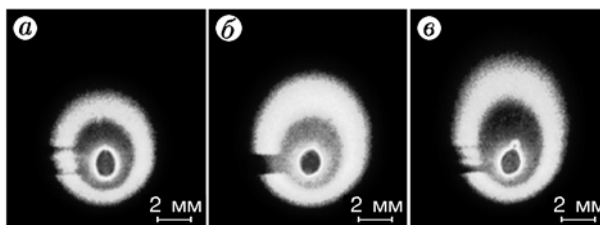


Рис. 9. Влияние добавки борана аммиака к этанолу на структуру пламени (из работы [22]):

a — чистый этанол, *b* — 3 % борана аммиака, *c* — 6 %, капли на каждом изображении одного диаметра, изображения получены усреднением снимков, сделанных в течение 4.2 мс

более чем 90%-ю пропускную способность УФ-излучения.

При воздействии лазерного излучения этанол интенсивно флуоресцирует, благодаря чему можно получить четкую границу капли [22] и тем самым определить ее размер в процессе горения. Это позволило провести сравнение различных горючих при одном и том же размере капель. На рис. 9 представлены полученные в [22] результаты. Установлено, что с ростом концентрации борана аммиака в этаноле концентрация ОН в зоне реакции возрастает, но при этом усиливается влияние естественной конвекции. Вызвано это наличием водорода, активно участвующего в процессе горения, что приводит к заметному увеличению скорости выгорания капли.

В самом конце процесса существенно меняется характер горения смеси этанол/боран аммиака. Горение становится нестабильным и хаотичным, как и в случае гелеобразных топлив, в которых это было вызвано образованием струй паров топлива. При этом происходят такие динамические процессы, как образование струй и локальное гашение пламени, которые зарегистрировать обычными методами высокоскоростной визуализации очень сложно.

Аналогичные измерения с помощью системы PLIF проводились и для топлив на основе керосина JP-8. Хотя для JP-8 не наблюдалась интенсивной флуоресценции, интенсивности сигнала всё же было достаточно для визуализации и грубой оценки размера и положения капель. Никаких существенных различий в структуре пламени во время квазиустановившегося режима горения капли керосина JP-8 без присадок и с присадками замечено не было [22], что указывает на отсутствие влия-

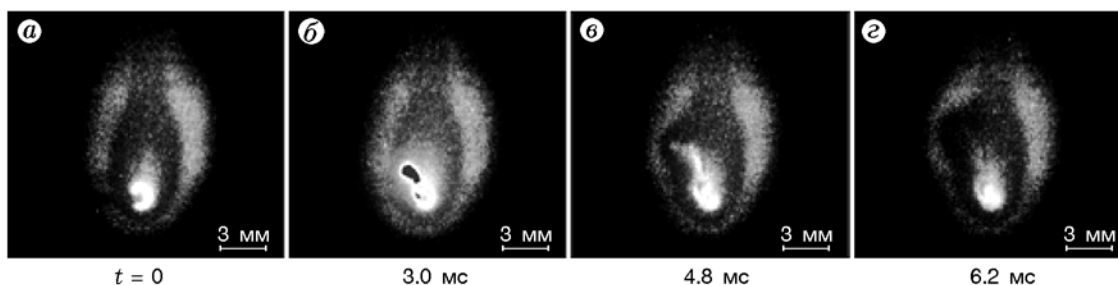


Рис. 10. Процесс образования струй при горении жидкого керосина JP-8 с добавлением нано-алюминия (3 % по массе) и Neodol (3 %) в качестве поверхностно-активных присадок

ния исследуемых присадок на характер горения капли. Это подтвердили также измерения скорости выгорания капель [22]. Указанные выше наблюдения позволяют предположить, что сначала происходит выгорание керосина JP-8, а присадки вступают в реакцию только в самом конце процесса.

После того как основная часть керосина выгорает, плавное поведение скорости выгорания капли сменяется хаотичным, так как порции горючего начинают выбрасываться с поверхности капли в зону реакций. Пример такого процесса показан нами на рис. 10. Как только горючее выбрасывается с поверхности капли, под действием лазерного излучения оно начинает интенсивно флуоресцировать (рис. 10,б). Затем эта порция горючего попадает непосредственно в диффузионное пламя (рис. 10,в), где она, взаимодействуя с окружением, локально возмущает зону реакций (рис. 10,г). Такой характер горения наблюдался для смесей JP-8/Neodol и JP-8/Neodol/наноалюминий и свидетельствует о влиянии поверхностно-активной присадки.

Таким образом, применение высокоскоростной PLIF-системы позволило исследовать динамику процессов горения капель жидких топлив с добавками. Одновременная визуализация жидкой и газовой фаз при высокой частоте возбуждающих импульсов позволила нам установить корреляцию между размером капели и протекающими реакциями в газовой фазе и определить таким образом изменения в зоне реакций, связанные с наличием присадок в топливе. Помимо этого, удалось зарегистрировать динамические хаотические процессы на последней стадии горения капли.

РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ PLIF-СИСТЕМЫ

Достижения в технологии изготовления полупроводниковых лазеров и ПЗС-матриц значительно повысили возможности современных PLIF-систем [30]. Этот метод можно успешно применять для исследования мелко-масштабных многофазных систем с быстропротекающими реакциями. Однако, кроме того, что метод PLIF можно использовать для получения информации о концентрациях компонентов, его можно применять и для измерения полей температуры и скорости [30].

Для измерения температуры необходимо установить дополнительный лазер, чтобы возбуждать сразу два перехода. При этом предпочтительно, чтобы переходы имели одно и то же возбужденное квантовое состояние, что позволит избежать различий, связанных со столкновительным тушением. Отношение сигналов флуоресценции связано с температурой, согласно Больцмановской статистике, которая описывает населенность поглощающих состояний [31].

Применение метода PLIF для визуализации трехмерных течений было предложено в 1990-х годах [16]. Для этого используется вращающееся зеркало, которое изменяет положение перетяжки лазерного ножа по отношению к камере. Тем не менее, при слишком низкой частоте возбуждающих импульсов лазерной системы поток может значительно измениться за время, прошедшее между импульсами. Однако при использовании современных быстродействующих полупроводниковых лазеров это ограничение снимается: они позволяют получить несколько двумерных снимков, разделен-

ных лишь долями миллисекунды. В результате снимки можно собрать в общую трехмерную временную картину полей концентрации соединений, температуры и скоростей потока.

Метод PLIF является в настоящее время общепринятым для измерения температуры и трехмерной визуализации течений и может использоваться для исследования реагирующих потоков в самых разных системах. Благодаря современным системам с исключительно высокой скоростью сбора данных, метод PLIF стал универсальным невозмущающим методом диагностики процессов горения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высокоскоростная PLIF-диагностика многофазных систем позволила получить информацию о состоянии сред, в которых происходит горение. При этом для ряда систем получены новые данные. В частности, установлено влияние поведения конденсированной фазы на структуру пламени. Впервые in-situ визуализирована структура пламени одиночного кристалла ПХА. Подробно охарактеризовано взаимодействие газовой и конденсированной фаз как при атмосферном, так и при повышенном давлении. В случае гелеобразных и жидких топлив визуализированы такие неустойчивые процессы, как образование пузырьков и струй. Показано, что эти процессы протекают настолько интенсивно, что возмущают факел диффузионного пламени и даже приводят к выбросам непрореагировавшего горючего, тем самым существенно влияя на процесс горения в целом. Определена структура пламени и сопоставлены концентрации ОН при горении капель жидких топлив в одинаковых условиях.

Во всех исследованных системах микромасштабные процессы, такие как горение кристаллов ПХА, выброс струй горючего при горении капель, протекают за время порядка нескольких миллисекунд, поэтому их исследование невозможно без высокого временного разрешения и высокой скорости сбора данных. Использование метода PLIF для визуализации конденсированной фазы и поля концентрации ОН в газовой фазе при частоте лазерных импульсов 5 кГц позволило выполнить уникальные измерения и установить особенности процесса горения.

Работа выполнена при поддержке Управления военно-морских исследований (США) в рамках программ NAVAIR ILIR и N-STAR

(Naval Research — Science and Technology for America's Readiness), ответственный — Скотт Мурро. Авторы также выражают благодарность за финансовую поддержку Научно-исследовательскому отделу военно-воздушных сил США (гранты N 08115784, FA9550-09-0073) и Научно-исследовательскому управлению сухопутных войск США (грант MURI N W911NF-08-1-0171).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kychakoff G., Howe R. D., Hanson R. K., McDaniel J. C.** Quantitative visualization of combustion species in a plane // *Appl. Opt.* — 1982. — V. 21, N 18. — P. 3225–3227.
2. **Hanson R. K.** Combustion diagnostics: Planar imaging techniques // *Symp. (Intern.) on Combustion.* — 1984. — V. 21, N 1. — P. 1681–1691.
3. **Dyer M. J., Crosley D. R.** Fluorescence imaging for flame chemistry // *Proc. Intern. Conf. Laser.* — 1985. — V. 84. — P. 211–218.
4. **McDonnell V. G., Samuelson G. S.** Measurement of fuel mixing and transport processes in gas turbine combustion // *Measur. Sci. Technol.* — 2000. — V. 11, N 7. — P. 870.
5. **Boxx I., Stohr M., Carter C., Meier W.** Sustained multi-kHz flamefront and 3-component velocity-field measurements for the study of turbulent flames // *Appl. Phys. B.* — 2009. — V. 95, N 1. — P. 23–29.
6. **Muller S. H. R., Bohm B., Gleibner M., Arndt S., Dreizler A.** Analysis of the temporal flame kernel development in an optically accessible IC engine using high-speed OH-PLIF // *Appl. Phys. B.* — 2010. — V. 100, N 3. — P. 447–452.
7. **Peterson B., Sick V.** Simultaneous flow field and fuel concentration imaging at 4.8 kHz in an operating engine // *Appl. Phys. B.* — 2009. — V. 94, N 7. — P. 887–895.
8. **Heeger C., Bohm B., Ahmed S. F., Gordon R., Boxx I., Meier W., Mastorakos E.** Statistics of relative and absolute velocities of turbulent non-premixed edge flames following spark ignition // *Proc. Combust. Inst.* — 2009. — V. 32, N 2. — P. 2957–2964.
9. **Hult J., Omrane A., Nygren J., Kaminski C., Axelsson B., Collin R., Alden M.** Quantitative three-dimensional imaging of soot volume fraction in turbulent non-premixed flames // *Experiments in Fluids.* — 2002. — V. 33, N 2. — P. 265–269.
10. **Nygren J., Hult J., Richter M., Alden M., Christensen M., Hultqvist A., Johansson B.** Three-dimensional laser induced fluorescence of fuel distributions in an HCCI engine // *Proc. Combust. Inst.* — 2002. — V. 29, N 1. — P. 679–685.

11. **Boxx I., Heeger C., Gordon R., Böhm B., Aigner M., Dreizler A., Meier W.** Simultaneous three component PIV/OH-PLIF measurements of a turbulent lifted, C_3H_8 argon jet-flame at (sustained) 1.5 kHz repetition rate // Proc. Combust. Inst. — 2009. — V. 32, N 1. — P. 905–912.
12. **Bastress B. K., Hall K. P., Summerfield M.** Modification of the burning rates of solid propellants by oxidizer particle size control // Amer. Rocket Soc. Paper. — 1961. — P. 1597–1561.
13. **Smooke M. D., Yetter R. A., Parr T. P., Hanson-Parr D. M., Tanoff M. A., Colket M. B., Hall R. J.** Computational and experimental study of ammonium perchlorate/ethylene counterflow diffusion flames // Proc. Combust. Inst. — 2000. — V. 28, N 2. — P. 2013–2020.
14. **Chorpening B. T., Knott G. M., Brewster M. Q.** Flame structure and burning rate of ammonium perchlorate/hydroxyl-terminated polybutadiene propellant sandwiches // Proc. Combust. Inst. — 2000. — V. 28, N 1. — P. 847–853.
15. **Hedman T. D., Cho K. Y., Satija A., Groven L. J., Lucht R. P., Son S. F.** Experimental observation of the flame structure of a bimodal ammonium perchlorate composite propellant using 5 kHz PLIF // Combust. Flame. — 2012. — V. 159, N 1. — P. 427–437.
16. **Cho K. Y., Hedman T. D., Satija A., Lucht R. P., Son S. F., Pourpoint T. L.** Microexplosion investigation of monomethylhydrazine gelled droplet with oh planar laser-induced fluorescence // J. Propul. Power. — 2013. — V. 29, N 6. — P. 1303–1310.
17. **Seitzman J. M., Hanson R. K.** Planar laser-fluorescence imaging of combustion gases // Appl. Phys. B. — 1990. — V. 50, N 6. — P. 441–454.
18. **Natan B., Rahimi S.** The status of gel propellants in year 2000 // Intern. J. Energetic Mater. Chem. Propul. — 2002. — V. 5, N 1. — P. 1–6.
19. **Rahimi S., Peretz A., Natan B.** On shear rheology of gel propellants // Propell., Explos., Pyrotech. — 2007. — V. 32, N 2. — P. 165–172.
20. **Solomon Y., Natan B., Cohen Y.** Combustion of gel fuels based on organic gellants // Combust. Flame. — 2009. — V. 156, N 1. — P. 261–268.
21. **Kunin A., Natan B., Greenberg J. B.** Theoretical model of the transient combustion of organic-gellant-based gel fuel droplets // J. Propul. Power. — 2010. — V. 26, N 4. — P. 765–771.
22. **Pfeil M., Groven L. J., Lucht R. P., Son S. F.** Effects of ammonia borane on the combustion of an ethanol droplet at atmospheric pressure // Combust. Flame. — 2013. — V. 160, N 10. — P. 2194–2203.
23. **Sippel T. R.** Characterization of nanoscale aluminum and ice solid propellants: M.S. thesis / Mechanical Engineering Department, Purdue University. — West Lafayette, Ind, USA, 2009.
24. **Hancock R. D., Bertagnolli K. E., Lucht R. P.** Nitrogen and hydrogen CARS temperature measurements in a hydrogen/air flame using a near-adiabatic flat-flame burner // Combust. Flame. — 1997. — V. 109, N 3. — P. 323–331.
25. **Edwards T., Weaver D. P., Campbell D. H.** Laser-induced fluorescence in high pressure solid propellant flames // Appl. Opt. — 1987. — V. 26, N 17. — P. 3496–3509.
26. **Hedman T. D., Reese D. A., Cho K. Y., Groven L. J., Lucht R. P., Son S. F.** An experimental study of the effects of catalysts on an ammonium perchlorate based composite propellant using 5 kHz PLIF // Combust. Flame. — 2012. — V. 159, N 4. — P. 1748–1758.
27. **Hedman T. D., Cho K. Y., Groven L. J., Lucht R. P., Son S. F.** The diffusion flame structure of an ammonium perchlorate based composite propellant at elevated pressures // Proc. Combust. Inst. — 2013. — V. 34, N 1. — P. 649–656.
28. **Atwood A. I., Boggs T. L., Curran P. O., Parr T. P., Hanson-Parr D. M., Price C. F., Wiknich J.** Burning rate of solid propellant ingredients, part 1: Pressure and initial temperature effects // J. Propul. Power. — 1999. — V. 15, N 6. — P. 740–747.
29. **Derr R. L., Boggs T. L.** Role of scanning electron microscopy in the study of solid propellant combustion: Part III. The surface structure and profile characteristics of burning composite solid propellants // Combust. Sci. Technol. — 1970. — V. 1, N 5. — P. 369–384.
30. **Alden M., Bood J., Li Z., Richter M.** Visualization and understanding of combustion processes using spatially and temporally resolved laser diagnostic techniques // Proc. Combust. Inst. — 2011. — V. 33, N 1. — P. 69–97.
31. **Laurendeau N. M.** Temperature measurements by light-scattering methods // Prog. Energy Combust. Sci. — 1988. — V. 14, N 2. — P. 147–170.

*Поступила в редакцию 8/IX 2014 г.,
в окончательном варианте — 18/III 2015 г.*