

УДК 535.8; 536.46; 662.61

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФфуЗИОННОГО ГОРЕНИЯ СУСПЕНЗИИ НАНОЧАСТИЦ БОРА В ИЗОПРОПАНОЛЕ В СПУТНОМ ПОТОКЕ КИСЛОРОДА МЕТОДАМИ ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

К. О. Айыыжы, Е. В. Бармина, В. Д. Кобцев, Д. Н. Козлов,
С. А. Кострица, С. Н. Орлов, А. М. Савельев, В. В. Смирнов,
Н. С. Титова, Г. А. Шафеев

Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, 119991 Москва, sergey.kostritsa@gmail.com

Проведены исследования стационарного диффузионного горения суспензии наночастиц бора в изопропанолe в спутном потоке кислорода и импульсного лазерного фотолитического инициирования такого горения. Эксперименты выполнены с применением ряда спектроскопических методов. Методом спектроскопии когерентного антистоксова рассеяния света определены поперечные распределения и концентрации молекул кислорода, диффундирующего в топливную струю, и изменение температуры в пламени на разных расстояниях от среза сопла горелки при введении в топливо наночастиц бора. Методом спектроскопии лазерно-индуцированной флуоресценции электронно-возбужденных молекул O_2^* найдены размеры зоны лазерного инициирования воспламенения горючей смеси. Спектроскопия хемилюминесценции промежуточных продуктов газофазных реакций (радикалов OH^* и BO_2^*) из области воспламенения позволила охарактеризовать пространственно-временную динамику развития этого процесса. По результатам анализа полученных данных предлагаются объяснения изменений температурного поля и динамики процесса воспламенения, наблюдаемых при добавлении в топливо наночастиц бора. В частности, предполагается, что характерный подъем температуры в области фронта пламени обусловлен прежде всего увеличением скорости горения топлива с наночастицами.

Ключевые слова: углеводородные и суспензионные топлива, наночастицы бора, диффузионное горение, оптическая диагностика горения.

DOI 10.15372/FGV20230207

ВВЕДЕНИЕ

Добавки наночастиц металлов, металлоидов и их соединений к жидким углеводородным топливам рассматриваются как эффективный способ улучшения теплофизических, эксплуатационных и экологических характеристик этих топлив [1–4]. Особый интерес в качестве энергоемких добавок к углеводородным топливам вызывают наночастицы алюминия и бора. И алюминий, и бор относятся к нетоксичным или слаботоксичным веществам с в 2–3 раза более высокой, по сравнению с углеводоро-

дами, объемной теплотой сгорания, а бор, кроме того, почти вдвое превосходит углеводороды также и по массовой теплоте сгорания. К настоящему моменту предложены и апробированы методы синтеза суспензий наночастиц Al и B в углеводородах, методы стабилизации таких суспензий, а также методы их хранения. Немаловажно и то, что наночастицы Al и B более доступны по сравнению с другими наноматериалами.

По результатам многочисленных экспериментов с суспензиями наноалюминия можно сделать вывод, что наночастицы Al не столько повышают объемную теплоту сгорания комбинированных топлив, сколько приводят к изменению их характеристик. Как оказалось, присадки наночастиц Al снижают температуру воспламенения капель углеводородного топлива и вызывают интенсификацию их испарения [5, 6]. Наночастицы Al расширяют концентрационные пределы воспламенения топлив-

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00419).

Доложено на II Международной научной конференции «Физика и химия горения и процессов в экстремальных условиях», 12–16 июля 2022, Самара.

© Айыыжы К. О., Бармина Е. В., Кобцев В. Д., Козлов Д. Н., Кострица С. А., Орлов С. Н., Савельев А. М., Смирнов В. В., Титова Н. С., Шафеев Г. А., 2023.

ных паров в смесях с воздухом, благодаря чему увеличивается диапазон устойчивой работы тепловых двигателей на химических топливах [7, 8]. Но основным результатом добавления даже небольшого количества этих частиц является эффективное промотирование ими горения углеводородных топлив и увеличение скорости тепловыделения в процессе реакций [9–11]. В ряде экспериментов проявились особенности горения суспензий наноалюминия. Так, например, при исследовании диффузионного горения наночастиц неактивированного Al в *n*-декане ($nC_{10}H_{22}$) обнаружено, что даже незначительная добавка Al в количестве 0.5 % вызывает повышение температуры газа в центре топливной струи диффузионного пламени на 200 K [11]. Анализ с привлечением методов имитационного моделирования показал, что наиболее вероятной причиной этого эффекта является поглощение агломератами наночастиц в центре потока теплового излучения молекул H_2O и CO_2 , находящихся в области фронта пламени. Важно отметить, что частота плазмонного резонанса агломерата наночастиц Al по мере его роста сдвигается к частотам основных полос излучения молекул H_2O и CO_2 [12].

Что касается суспензий наночастиц бора, то их горение пока изучено гораздо слабее. В работе [13] исследовалось горение суспензий наночастиц бора и железа в *n*-декане и этаноле (C_2H_5OH). Использовались разбавленные суспензии с массовой долей наночастиц 5 % и концентрированные суспензии, содержащие 20 % наночастиц. В суспензию на основе *n*-декана вводились поверхностно-активные вещества для стабилизации дисперсной фазы. Экспериментальные данные, полученные в [13], показали, что наночастицы В в разбавленных суспензиях сгорают одновременно с углеводородом. При горении концентрированных суспензий наблюдалась тенденция к образованию агломератов наночастиц. При этом агломераты, которые могли сгорать в пламени *n*-декана, не сгорали в пламени этанола. В работе [14] изучалось горение капель суспензии наночастиц кристаллического и аморфного бора в коммерческом реактивном топливе Jet A-1. Суспензии содержали до 10 % бора, при этом авторы отметили, что аморфный бор горел в смеси с топливом Jet A-1 гораздо лучше, чем кристаллический.

Весьма многообещающие результаты получены в экспериментах по горению наноча-

стиц В в углеводородных пламенах горелок с предварительным смешением компонентов смеси. Как известно, основным препятствием на пути практического применения микрочастиц В в качестве энергоносителя являются трудности с достижением высокой полноты сгорания. Для воспламенения отдельной частицы В требуется полное удаление оксидного слоя, что возможно лишь при достаточно высоких температурах окислительного газа: ≈ 1900 K в случае сухого окислительного газа и ≈ 1800 K, если окислительный газ содержит водяные пары [15]. Существенно затрудняет сжигание дисперсного В и агломерация частиц [16]. Эксперименты с горением наночастиц В в углеводородных пламенах горелок с предварительным смешением показали принципиальную возможность сжигания этих частиц с высокой полнотой.

Так, в работе [17], в которой исследовалось горение наночастиц В размером 70 нм в пламени этанола, по итогам анализа конденсированных продуктов сгорания термогравиметрическими и рентгенодифракционными методами был сделан вывод, что эти продукты практически полностью окислены. Примечательно, что в [17] высокая полнота сгорания была получена и при сжигании спеченных наночастиц В размером около 300 нм, имитирующих агломераты. Высокая полнота сгорания бора отмечалась и в работе [18], где исследовалось горение тернарного нанопорошка Ti—Al—В в пламени *n*-декана. Горение агломератов наночастиц В изучалось также и в экспериментах [19] в плоском пламени предварительно перемешанной смеси $CH_4—O_2—Ar$. Как и для микронных частиц, обнаружено, что горение протекает в два этапа: вначале испарение оксидного слоя, затем горение наночастиц В, свободных от оксида. Авторы [19] сообщают, что удаление оксидного слоя и переход ко второму этапу окисления наблюдались уже при температуре пламени 1578 K, что заметно ниже тех температур, при которых воспламеняются частицы бора микронных размеров.

В современных энергоустановках и тепловых двигателях применяется, как известно, диффузионное сжигание топлива. В отличие от горелок с предварительным смешением, в горелочных устройствах диффузионного типа топливо и окислитель подаются отдельно в зону горения. С точки зрения воспламенения наночастиц В такой способ организации про-

цесса горения имеет как свои преимущества, так и недостатки. Среди преимуществ следует выделить прежде всего истончение оксидного слоя при движении наночастиц к фронту пламени вследствие реакции оксида бора с парами воды, диффундирующими со стороны фронта. В то же время со стороны фронта диффундируют кислород и другие окислители, реакция с которыми способствует увеличению оксидного слоя. Принимая во внимание эти факторы, было бы преждевременным обобщать результаты экспериментов по сжиганию наночастиц В в пламенах горелок с предварительным смешением компонентов на диффузионное сжигание суспензий наноразмерного бора. Чтобы понять, как особенности диффузионного горения сказываются на воспламенении и горении суспензий наночастиц В в углеводородном топливе, требуется провести развернутое экспериментально-теоретическое изучение диффузионного пламени таких суспензий.

В нашей недавней работе [20] методом спектроскопии когерентного антистоксова рассеяния света (КАРС) были проведены предварительные измерения распределения температуры в пламени при ламинарном диффузионном горении в спутном потоке кислорода суспензии наночастиц В в изопропанол ($i\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$). Цель настоящей работы — экспериментальное исследование ряда характеристик как стационарного диффузионного горения изопропанола с добавками наночастиц В и чистого изопропанола в спутном потоке кислорода, так и лазерного фотолитического инициирования такого горения методами оптической спектроскопии, а также предварительный анализ тех физико-химических процессов, которые определяют эти характеристики. К упомянутым характеристикам относятся изменение поля температур в пламени за счет добавки наночастиц В и распределение концентрации диффундирующего в струю топлива O_2 , измеренные с помощью спектроскопии КАРС, размеры зоны лазерного инициирования воспламенения, определенные с использованием спектроскопии лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ), а также пространственно-временная динамика свечения из области воспламенения электронно-возбужденных радикалов OH^* и VO_2^* — промежуточных продуктов газофазных реакций, зарегистрированного (свечения) с применением спектроскопии хемилюминесценции.

СУСПЕНЗИОННОЕ ТОПЛИВО И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В экспериментах по диффузионному горению комбинированного топлива — суспензии наночастиц бора в изопропанол — использовались наночастицы промышленного производства. Подробно характеристики этих частиц, исследованные с применением просвечивающей электронной микроскопии, рентгеновской порошковой дифрактометрии и центрифугирования, представлены в [20]. В частности, геометрические параметры наночастиц определялись с помощью измерительной дисковой центрифуги. В растворе с максимально допустимой для функционирования центрифуги концентрацией 200 мкг наночастиц В на 1 мл изопропанола наблюдалось бимодальное распределение массы наночастиц по их диаметрам d , с первым узким пиком, соответствующим среднему диаметру частиц 13 нм, и вторым широким пиком с максимумом около 750 нм. Бимодальность сохраняется и в распределениях количества наночастиц и площади их поверхности по диаметрам. При этом интегральное (по уровню 0.5 в распределениях) соотношение мелких и крупных частиц составляло: по массе $\approx 1/100$, по количеству $\approx 1\,000$, по площади поверхности $\approx 1/2$. Эти соотношения соответствуют сферическим наночастицам.

Широкие пики на представленной в [20] дифрактограмме показывают, что использованные наночастицы В являются аморфными. В то же время в них присутствует кристаллическая фаза гидроксида бора $\text{B}(\text{OH})_3$, которая характеризуется хорошо различимыми узкими линиями. Линии, отвечающие кристаллическим модификациям оксида бора B_2O_3 , не проявляются, поэтому можно предположить, что оксид бора на поверхности наночастиц является аморфным.

Эксперименты с диффузионным горением суспензии наночастиц В в $i\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$ выполнялись с использованием подробно описанного в [11, 21] спектрометрического измерительного комплекса, состоящего из горелочного устройства и системы оптической диагностики на основе спектроскопии КАРС. Этот комплекс был усовершенствован и дополнен аппаратурой для спектроскопии ЛИФ и хемилюминесценции, а также лазерной системой фотолитического инициирования воспламенения горючей смеси.

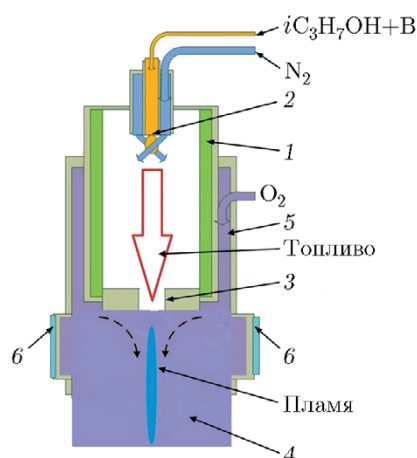


Рис. 1. Схема горелки:

1 — испаритель, 2 — топливопровод, 3 — щелевое сопло, 4 — зона горения, 5 — кольцевой инжектор, 6 — оптическое окно

Схема горелочного устройства диффузионного типа, в принципе аналогичного предложенному в [11] и детально рассмотренного в [21], приведена на рис. 1. Его основным элементом является трубка испарителя 1, в котором приготавливается парогазовая топливная смесь. Жидкое топливо непрерывно поступало в испаритель по капиллярному топливопроводу 2. Для выноса топливной смеси в зону горения использовался инертный газ — азот, подаваемый в испаритель через инжектор. Струя азота, выходя из кольцевого инжектора шириной 0.1 мм со скоростью 60 м/с, обдувала капилляр подачи топлива, производя распыление суспензии. Смесь $N_2/iC_3H_7OH/V$ подогревалась в испарителе до температуры 200 °С. Полученная однородная парогазовая смесь через щелевое сопло 3 поперечных размеров 2×6 мм, обеспечивающее близкую к плоской форму топливной струи, впрыскивалась в зону горения 4. Кислород подавался в зону горения через кольцевой инжектор 5. Смешивание кислорода с топливом происходило диффузионным образом в потоке в зоне горения, которая ограничивалась снабженной оптическими окнами 6 цилиндрической обечайкой из кварцевого стекла. Расходы изопропанола, кислорода и азота в экспериментах были следующими: iC_3H_7OH — 0.5 мл/мин, N_2 — 1.5 станд. л/мин, O_2 — 12.9 станд. л/мин. При этом высота факела пламени составляла около 40 мм.

КАРС-спектрометр (детальное описание см. в [11, 21]) был построен на основе

импульсно-периодического $Nd^{3+}:YAG$ -лазера (длительность импульса 10 нс, частота повторения 10 Гц). Его удвоенное по частоте излучение с длиной волны $\lambda = 532$ нм использовалось как в качестве одного из пучков накачки в процессе КАРС, так и для накачки стоксова лазера на красителе с широким и безмодовым спектром вблизи $\lambda = 607$ нм, настроенным для получения когерентного рассеяния на колебательно-вращательных переходах молекул N_2 . Нелинейное взаимодействие скрещивающихся сфокусированных лазерных пучков обеспечивало при использовании линзы с фокусным расстоянием 300 мм локальность и высокое пространственное разрешение КАРС-измерений при диаметре зондируемого объема ≈ 0.04 мм и длине ≈ 2 мм. Антистоксово излучение из зондируемого объема (на длине волны 473 нм) доставлялось к спектрографу, и спектр этого излучения регистрировался высокочувствительным стробируемым матричным фотоприемником. Температура в пламени определялась из КАРС-спектров молекул N_2 , осредненных по результатам 100 лазерных вспышек.

Относительная концентрация компонентов газовой среды (N_2 или O_2) определялась по интенсивности антистоксова излучения этого компонента, при этом регистрация КАРС-спектров на переходах молекул O_2 требовала перестройки центральной длины волны спектра стоксова лазера.

Для изучения пространственных распределений температуры в пламени и локальных концентраций диффундирующих в струю топлива молекул O_2 горелочное устройство располагалось на трехкоординатном столе, который позволял перемещать пламя относительно лазерных пучков с точностью позиционирования ≈ 10 мкм [21]. На рис. 2 схематично показаны взаимное расположение пламени и лазерных пучков накачки при КАРС-измерениях температур и концентраций, а также оси используемой системы координат. Ось x перпендикулярна плоскости пламени, ось y параллельна оптической оси лазерных пучков, а ось z направлена вдоль оси потоков топлива и кислорода, при этом начало координат $z = 0$ совмещено с выходным сечением сопла.

Относительная случайная погрешность измерений температуры за время, равное длительности одного лазерного импульса (≈ 10 нс), составляла 3.1 %. При увеличении времени измерения до 10 с (осреднение по 100 лазер-

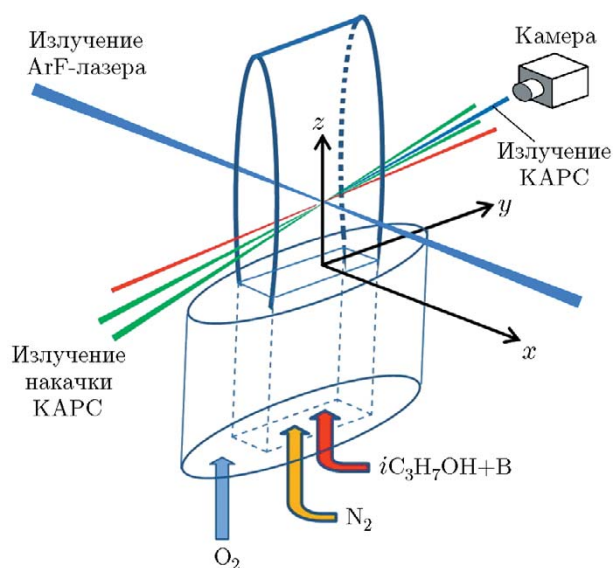


Рис. 2. Схематическое изображение относительного расположения горелки, пламени, лазерных пучков накачки и генерируемого излучения КАРС, а также лазерного пучка, инициирующего воспламенение смеси

ным импульсам) относительная случайная погрешность уменьшалась до 0.3 %. Относительная систематическая погрешность при этом составляла 0.2 %.

Аппаратура и оборудование для лазерного фотолитического инициирования воспламенения и спектроскопии ЛИФ и хемилюминесценции включали в себя AgF-лазер с излучением на длине волны 193 нм (длительность импульса 15 нс, частота повторения до 100 Гц, энергия в импульсе до 200 мДж), направленным вдоль оси x и фокусируемым линзой из CaF_2 (фокусное расстояние 200 мм) в центр потока; высокочувствительную стробируемую матричную камеру (690×255 пкс) с усилителем яркости, УФ-объективом и полосовыми фильтрами на выбранные диапазоны длин волн — для регистрации свечения области воспламенения вдоль оси y (см. рис. 2); генератор задержанных импульсов. Более подробное описание экспериментальной установки можно найти в работах [22, 23].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ДИФфуЗИОННЫМ ГОРЕНИЕМ СУСПЕНЗИИ БОРА В ИЗОПРОПАНОЛЕ

Поперечные распределения температур в потоке (вдоль оси x) при горении топлива с добавками наночастиц В и без них, измеренные с

применением спектроскопии КАРС, представлены на рис. 3. На малых расстояниях от среза сопла ($z = 2 \div 5$ мм) профили температуры газа в пламени топлива с добавками наночастиц В и в пламени чистого изопропанола повторяют друг друга. Температура плавно возрастает по мере увеличения расстояния от центра потока, достигая максимума в области фронта горения. Так, максимальная температура фронта пламени при $z = 5$ мм составляет 2200 К. Однако при дальнейшем увеличении расстояния от среза сопла вниз по потоку температура в области фронта пламени при горении изопропанола с добавкой наночастиц В становится выше, чем при горении чистого изопропанола. На расстоянии $z = 14$ мм соответствующие значения температуры равны 2460 и 2310 К. При $z \geq 14$ мм эта разница температур в 150 К стабилизируется на фронте пламени. Далее вниз по потоку это различие уменьшается до 100 К при $z = 19$ мм и до 30 К при $z = 30$ мм. Таким образом, измеренные в экспериментах распределения температуры показывают, что при горении суспензии наночастиц бора используемой концентрации температура фронта пламени на расстоянии $z = 14$ мм приблизительно на 150 К выше, чем при горении чистого изопропанола.

Интересно отметить, что в выполненных нами ранее измерениях [11] в диффузионном пламени суспензии наночастиц Al в n -декане повышение температуры относительно температуры в пламени чистого n -декана наблюдалось не только в области фронта, но и в центре топливной струи. Добавка наноалюминия в количестве 0.5 % к n -декану приводила к повышению температуры топливной струи более чем на 200 К уже на расстоянии $z = 5$ мм от среза сопла. В настоящем эксперименте повышения температуры в центре топливной струи при добавке наночастиц В к $i\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$ не наблюдалось даже на расстояниях $z \approx 19$ мм.

Помимо определения поперечных профилей температуры, изучалось также свечение пламени. Нужно отметить, что в отличие от пламени $i\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$, которое имело типичный для углеводородов голубой цвет, пламя суспензии $i\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}/\text{В}$ было окрашено в интенсивный зеленый цвет, как это хорошо видно на цветных фотографиях пламени, приведенных в [20]. Зеленый цвет пламени свидетельствует о наличии большого количества электронно-возбужденных радикалов

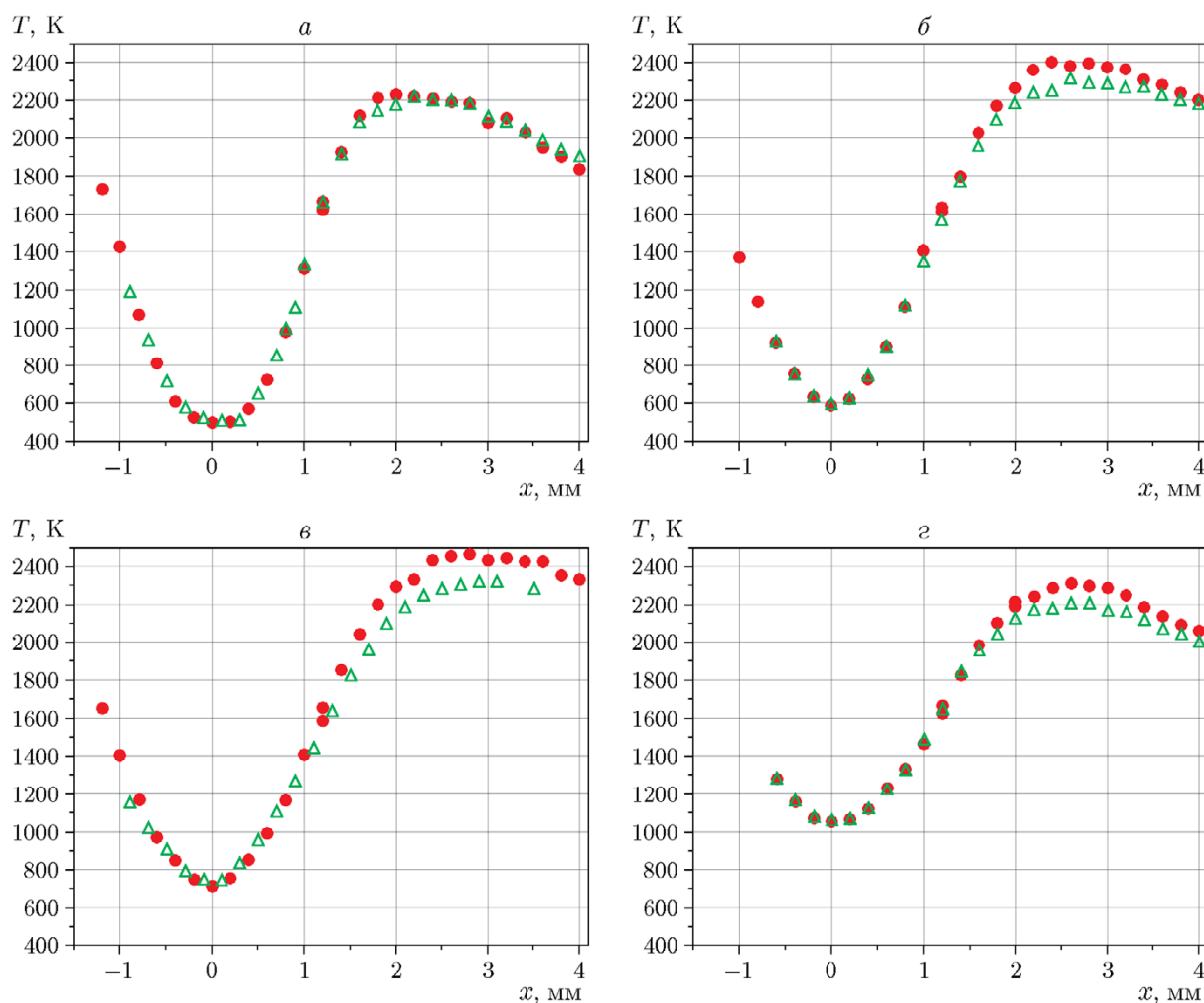


Рис. 3. Поперечные распределения температуры в пламени (вдоль оси x) на расстояниях $z = 5$ (а), 10 (б), 14 (в), 19 мм (г) от среза сопла при горении чистого iC_3H_7OH (Δ) и суспензии iC_3H_7OH/V с концентрацией 4 мг бора на 1 мл изопропанола ($\bullet$)

BO_2^* — основного промежуточного продукта газофазного окисления бора — в продуктах сгорания суспензии. Это подтверждается полученными нами на разных расстояниях от среза сопла спектрами свечения пламени в поперечном направлении (вдоль оси x), с характерными полосами хемилюминесценции BO_2^* в видимой области, в диапазоне длин волн $\lambda = 450 \div 600$ нм (рис. 4). Из фотографий в [20] и спектров на рис. 4 видно, что BO_2^* присутствует не только в области развитого горения, в которой происходит смыкание фронтов пламени, но и на фронтах пламени и в ядре топливного потока. Это указывает на то, что химические процессы с участием наночастиц В активно протекают во всей области течения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ЛАЗЕРНЫМ ИНИЦИИРОВАНИЕМ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

В экспериментах с лазерным фотолитическим инициированием воспламенения парогазовой смеси N_2/iC_3H_7OH или $N_2/iC_3H_7OH/V$ в спутном потоке окислителя (газ O_2) наносекундным импульсом излучения эксимерного ArF-лазера на длине волны $\lambda = 193$ нм исследовался как спектральный состав излучения из области воспламенения, так и пространственно-временная эволюция изображений свечения, зарегистрированных с задержкой относительно лазерного импульса. Ранее нами были проведены эксперименты по инициированию воспламенения предварительно перемешанных подогретых смесей O_2-H_2

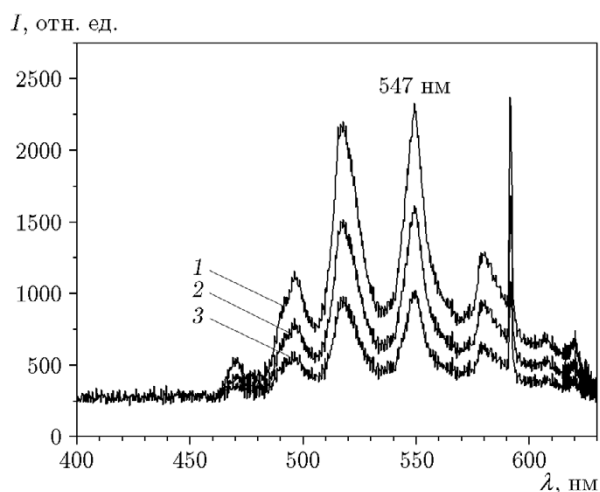


Рис. 4. Спектры свечения пламени суспензии $i\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}/\text{V}$ на расстоянии от среза сопла $z = 10$ (3), 14 (2), 19 мм (1):

наиболее интенсивная полоса хемилюминесценции VO_2^* — на длине волны 547 нм, острый пик на длине волны 590 нм — атомарная линия Na

и $\text{O}_2\text{—CH}_4$ излучением ArF-лазера [22, 23] и показано, что фотодиссоциация (фотолиз) молекул O_2 этим излучением на два атома O в основном электронном состоянии при энергиях импульса $E_p > 5$ мДж приводит к устойчивому воспламенению исследуемых смесей в течение малого времени индукции.

Инициирование воспламенения горючей смеси, образованной взаимной диффузией топлива ($\text{N}_2/i\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$ или $\text{N}_2/i\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}/\text{V}$) и кислорода в спутных потоках, проводилось на расстоянии $z = 14$ мм от среза сопла горелки. Перед этим с использованием спектроскопии КАРС в отсутствие горения на разных расстояниях от среза сопла измерялись распределения относительных концентраций диффундирующих в струю топлива молекул O_2 в поперечном сечении потока (вдоль оси x), аналогично тому, как это делалось в [11]. Измерения показали, что на расстоянии $z = 14$ мм «провал» концентрации O_2 в центре потока имеет ширину ≈ 3.0 мм, а сама концентрация на его оси возрастает примерно втрое по сравнению с ее значением при $z = 5$ мм и оказывается достаточной для устойчивого инициирования воспламенения.

На рис. 5 в условном цвете представлено изображение области лазерно-индуцированной флуоресценции молекул O_2^* на длине волны вблизи 310 нм в фокальной области лу-

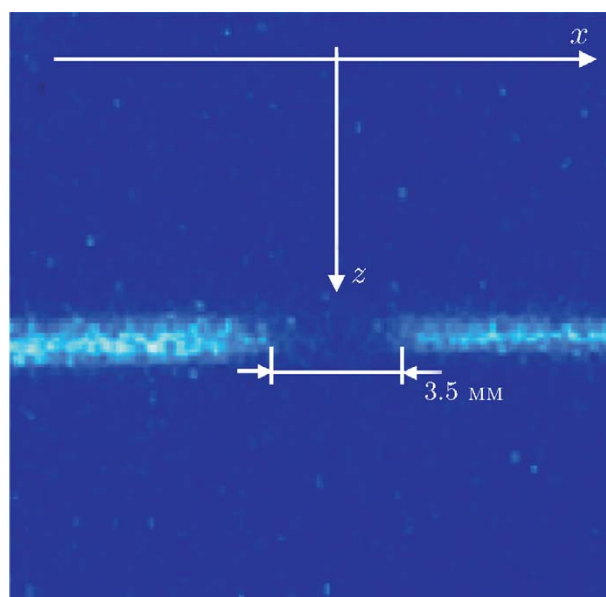
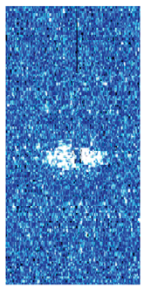
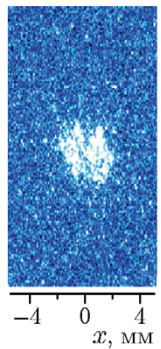
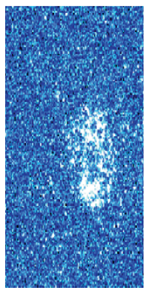
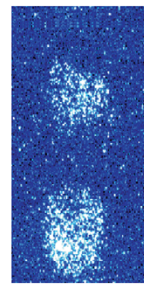
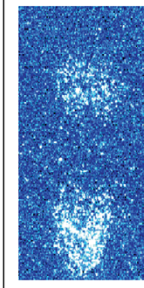
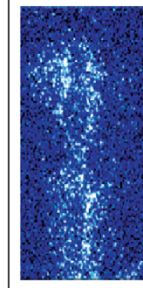
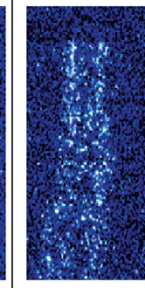
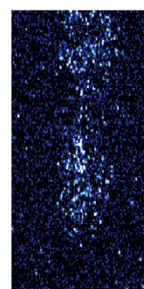
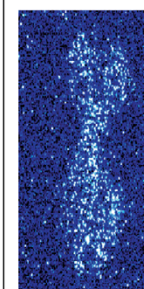
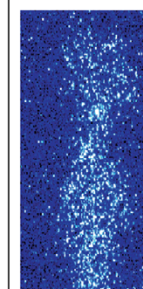
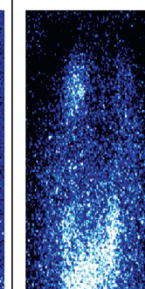


Рис. 5. Изображение (в условном цвете) области лазерно-индуцированной флуоресценции молекул O_2^* ($\lambda \approx 310$ нм), вызванной распространяющимся вдоль оси x сфокусированным излучением ArF-лазера в кислородно-азотном потоке без добавления топлива

ча эксимерного лазера во время активации кислородно-азотного потока (при перекрытой подаче изопропанола). Излучение эксимерного лазера с энергией импульса 5 мДж было сфокусировано линзой в область с поперечными размерами 0.65×2.5 мм. Это излучение распространялось вдоль оси x , а изображение регистрировалось вдоль оси y (см. рис. 2) с временем экспозиции 0.2 мкс. Спутный поток O_2 направлялся сверху вниз вдоль внешней стороны цилиндрического испарителя (см. рис. 1). Снаружи этот поток был ограничен корпусом кварцевой трубки. Азот, как несущий газ для топлива, протекал во внутренней области испарителя. Результирующий поток на уровне выходного сопла горелки представлял собой струю азота, вокруг которой соосно распространялся кислород. Такая геометрия течения сохранялась вниз по потоку до расстояний $z \leq 19$ мм от среза сопла горелки, при взаимной диффузии N_2 и O_2 . Поскольку флуоресценция O_2^* происходит только во время прохождения лазерного импульса (верхнее возбужденное состояние $B^3\Sigma_u^-$ молекулы O_2 является преддиссоционным в разлетные термы $^3\Pi_u$ и $^5\Pi_u$ с временем жизни ≈ 0.2 пс), то область свечения показывает степень проникновения O_2 в поток

Таблица 1

Пространственно-временная динамика развития областей хемилюминесценции после прохождения импульса излучения ArF-лазера через струю горючей смеси ($z = 14$ мм)

	Δt , мкс						
	2	20	50	400	600	900	1100
ОН*, 308 нм, iC_3H_7OH							
ВО ₂ *, 547 нм							

Примечание. Изображения представлены в одном масштабе.

азота и определяет зону образования атомарного кислорода. Из рис. 5 можно определить, что «разрыв» в хемилюминесценции (область относительной малой концентрации O_2) находится в центре струи азота толщиной $4 \div 5$ мм, а длина «разрыва» составляет ≈ 3.5 мм, в соответствии с нашими КАРС-измерениями распределения концентраций O_2 в потоке. Ширина области свечения O_2^* в лазерном пучке на рис. 5 составляет ≈ 0.65 мм.

Динамика развития областей хемилюминесценции электронно-возбужденных радикалов ОН* и ВО₂* после импульсного лазерного воздействия на струю горючей смеси регистрировалась по изображениям областей свечения этих радикалов, полученным с заданной задержкой Δt относительно лазерного импульса в различных спектральных диапазонах. В табл. 1 представлены изображения областей хемилюминесценции радикалов ОН* при воспламенении чистого изопропанола в интервале задержек $\Delta t = 2 \div 1100$ мкс до времени установления стационарного горения. Табл. 1 со-

держит также изображения областей хемилюминесценции радикалов ВО₂* (при воспламенении суспензии iC_3H_7OH/V), начиная с задержки $\Delta t = 400$ мкс (времени появления свечения радикалов ВО₂*) и до $\Delta t = 1100$ мкс. Свечение радикалов ОН* регистрировалось вблизи длины волны 308 нм, а радикалов ВО₂* — вблизи $\lambda = 547$ нм. Время экспозиции каждого кадра было одинаковым и равнялось 2 мкс.

Трансформация во времени пространственных конфигураций областей свечения («пятен») с переходом к картине стационарного пламени, представленная в табл. 1, в случае радикалов ОН* отвечает быстрому образованию двух областей развития локального разогрева и воспламенения горючей смеси, инициированного реакциями молекул iC_3H_7OH с атомами О, а затем с молекулами O_2 . Эти области образуются в зонах пересечения лазерного пучка с пограничными слоями струй топлива и кислорода (два различных пятна на расстоянии ≈ 2.6 мм вдоль оси x при $\Delta t = 2$ мкс) и затем начинают перемещаться вверх и вниз

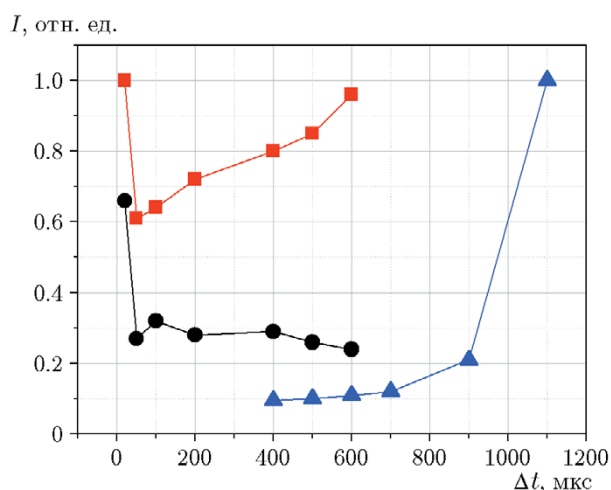


Рис. 6. Динамика изменения интенсивности свечения радикалов OH^* (вблизи $\lambda = 308$ нм) при воспламенении чистого iC_3H_7OH (■) и суспензии iC_3H_7OH/B (●), а также радикалов BO_2^* (вблизи $\lambda = 547$ нм) при воспламенении суспензии iC_3H_7OH/B (▲) в зависимости от задержки момента регистрации после импульса эксимерного лазера

вдоль оси z в области несгоревшей горючей смеси (при $\Delta t = 20 \div 400$ мкс). Разогрев и воспламенение горючей смеси в ограниченных областях приводят к ее воспламенению вдоль всего потока (при $\Delta t = 400 \div 1100$ мкс). В случае радикалов BO_2^* при воспламенении суспензии iC_3H_7OH/B трансформация конфигураций областей свечения характеризует более медленное формирование областей, в которых начинают эффективно протекать химические процессы с участием наночастиц В. Более детальный анализ процесса воспламенения с учетом параметров потока горючей смеси и характеристик лазерного инициирования воспламенения может быть предметом отдельного исследования.

Сравнение интенсивностей хемилюминесценции радикалов OH^* при лазерном инициировании воспламенения чистого iC_3H_7OH и суспензии iC_3H_7OH/B показало, что интенсивность свечения радикалов OH^* при воспламенении суспензии iC_3H_7OH/B примерно в два раза слабее, чем при воспламенении чистого изопропанола. При этом в первом случае размеры области свечения оказываются больше, чем во втором.

На рис. 6 показаны изменения интегральной характеристики интенсивности хемилюминесценции радикалов OH^* для суспензионного и чистого топлив, а также радикалов BO_2^*

для суспензионного топлива в зависимости от задержки Δt момента регистрации после импульса ArF-лазера. Представленные величины получены интегрированием интенсивности свечения в центральном (при задержке 20 мкс) или нижнем (при больших задержках) пятне вдоль вертикальной оси (оси z). Добавки наночастиц бора в топливо приводят к уменьшению интенсивности свечения радикалов OH^* . Интенсивность хемилюминесценции радикалов BO_2^* экспоненциально возрастает при стремлении времени задержки к величине, соответствующей установлению стационарного горения. Одновременно с этим наблюдается небольшой монотонный спад интенсивности свечения радикалов OH^* в процессе воспламенения суспензионного топлива и ее устойчивый рост в процессе воспламенения чистого изопропанола.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Итак, добавка наночастиц бора в количестве 0.5 % от массы изопропанола вызывает повышение температуры фронта пламени приблизительно на 150 К. Ранее похожий эффект наблюдался в эксперименте [11] при диффузионном горении суспензии неактивированных наночастиц Al в n -декане в спутном потоке кислорода: добавка 2.5 % наночастиц повышала температуру фронта более чем на 200 К. Заметное повышение температуры, на 237 К, зарегистрировано и в ламинарном пламени бутана с добавкой 5 % пассивированного наноалюминия [24].

Если исходить из сложившихся представлений о процессах в ламинарных диффузионных пламенах, то повышение температуры фронта пламени может быть обусловлено либо выделением дополнительного количества теплоты на фронте, либо изменением тепло- и массопереноса в пламени, либо ускорением химических реакций.

Выделение дополнительного количества теплоты на фронте пламени при горении наночастиц бора может быть обусловлено более высокой по сравнению с изопропанолом теплопроизводительностью бора. Теплопроизводительность определяется выражением

$$Q_p = H_u / (1 + L_0), \quad (1)$$

где H_u — стандартная теплота сгорания, L_0 — стехиометрическое отношение кислород/топливо. Стандартная теплота сгора-

ния бора, 57.9 МДж/кг, почти в два раза превышает теплоту сгорания изопропанола, 34 МДж/кг. Кроме того, стехиометрическое отношение кислород/бор, равное 2.2, несколько меньше, чем отношение кислород/изопропанол — 2.39. Поэтому по теплопроизводительности бор значительно превосходит изопропанол. Следовательно, добавки бора к изопропанолу должны вызывать повышение температуры фронта пламени. Чтобы понять, может ли увеличение температуры фронта на 150 К быть обусловлено повышенной теплопроизводительностью бора, надо оценить, на сколько градусов повышается температура фронта пламени при добавке к изопропанолу наночастиц бора в количестве 0.5 %. Оценку повышения температуры ΔT можно получить с помощью неравенства

$$Y_B Q_B / c_{p,e} < \Delta T < Y_B Q_B / c_{p,f}, \quad (2)$$

где Q_B — химическая энергия, выделяющаяся в высокотемпературных продуктах при сгорании 1 кг бора, равная 34.5 МДж/кг [1], Y_B — массовая доля бора в горючей смеси с такой же стехиометрией, как и на фронте пламени, $c_{p,e}$, $c_{p,f}$ — равновесная и химически «замороженная» теплоемкости продуктов горения на фронте пламени. Неравенство (2) отражает тот факт, что выделяющаяся в продуктах сгорания теплота расходуется не только на подогрев продуктов, но и на изменение их химического состава. Теплоемкости $c_{p,e}$, $c_{p,f}$ могут быть найдены путем термодинамического расчета параметров равновесного состояния продуктов сгорания на стехиометрической поверхности фронта пламени. Для такого расчета необходимо знать элементный состав горючей смеси на стехиометрической поверхности, температуру и давление. Элементный состав можно найти из следующих соображений. Соотношение между топливом и кислородом на стехиометрической поверхности определяется коэффициентом L_0 . Пусть массовая доля N_2 на стехиометрической поверхности равна Y_{N_2} . Тогда массовая доля O_2 в горючей смеси с той же стехиометрией, что и на фронте пламени, равна $Y_{O_2} = (1 - Y_{N_2})L_0 / (1 + L_0)$, массовая доля iC_3H_7OH — $Y_f = 0.995(1 - Y_{N_2}) / (1 + L_0)$, массовая доля бора — $Y_B = 0.005(1 - Y_{N_2}) / (1 + L_0)$. Зная массовые доли Y_{N_2} , Y_{O_2} , Y_f , Y_B , легко определить элементный состав горючей смеси на стехиометрической поверхности пламени. В табл. 2 приведены результаты термодинамического

Таблица 2

Результаты термодинамического расчета теплоемкостей продуктов сгорания

Параметр	Значение
L_0	2.396
Y_f^0	0.23
Y_{O_2}	0.56
Y_{N_2}	0.20
Y_B	$1.1 \cdot 10^{-3}$
$c_{p,f}$, Дж/кг	1 800
$c_{p,e}$, Дж/кг	2 988

ского расчета теплоемкостей $c_{p,e}$, $c_{p,f}$ в сечении, отстоящем от среза сопла на расстояние $z = 14$ мм. Массовая доля азота на фронте пламени в данном расчете была принята, на основе результатов измерения поперечного распределения N_2 в сечении $z = 14$ мм, равной 0.20. В табл. 2 приведены, кроме того, исходные данные, которые использовались в термодинамическом расчете теплоемкостей: стехиометрическое отношение окислитель/топливо L_0 и компонентный состав реагирующей смеси с такой же стехиометрией, как и на фронте пламени. Расчет был выполнен для атмосферного давления и той температуры фронта пламени, которая была зарегистрирована в эксперименте на расстоянии $z = 14$ мм от среза сопла — 2310 К. Подставляя теплоемкости из табл. 2 в формулу (1), получаем оценку повышения температуры на фронте пламени: $13 < \Delta T < 22$ К. Таким образом, добавка наночастиц бора к изопропанолу в количестве 0.5 % от массы последнего может вызвать повышение температуры не более чем на 22 К. Но в эксперименте в сечении $z = 14$ мм было зарегистрировано повышение температуры фронта на 150 К. Следовательно, это повышение не может быть обусловлено теплотой сгорания бора.

Влияние коэффициентов тепло- и массопереноса на температуру фронта пламени проявляется в основном через число Льюиса Le . В модели тонкого фронта пламени для температуры продуктов сгорания на фронте (T) может быть получено приближенное соотношение

$$Le(T - T_f) \approx T_a - T_f, \quad (3)$$

где T_f — температура топливной смеси на оси потока, T_a — адиабатическая температура

продуктов сгорания. Согласно (3) изменению температуры фронта ΔT отвечает изменение числа Льюиса, равное

$$\Delta Le \approx -\frac{Le^2}{T_a - T_f} \Delta T. \quad (4)$$

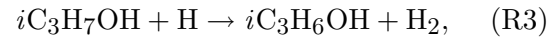
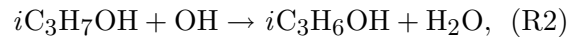
Для чисто газового пламени $Le \approx 1$. Значит, в сечении $z = 14$ мм разность температур $T - T_f = T_a - T_f$ составляет, с учетом данных эксперимента, приблизительно 1500 К. Следовательно, чтобы температура фронта повысилась на 150 К, число Льюиса должно уменьшиться, согласно (4), не менее чем на 10 %. Представляется вполне очевидным, что незначительное количество бора в реагирующей смеси на фронте пламени (см. табл. 2) не способно настолько сильно повлиять на теплопроводность и диффузию, чтобы число Льюиса уменьшилось на 10 %.

Наиболее вероятной причиной повышения температуры фронта пламени, по нашему мнению, является ускорение химических реакций окисления изопропанола в присутствии наночастиц бора. Температура фронта пламени определяется конкуренцией двух процессов: тепловыделения за счет химических реакций и передачи тепла от фронта пламени. Если время теплопередачи τ_h много меньше времени тепловыделения, связанного с химическими реакциями τ_r , то горение невозможно, так как тепловые потери столь велики, что выделившееся тепло мгновенно рассеивается. В противоположном случае, когда $\tau_r \ll \tau_h$, температура фронта достигает адиабатической. Такое соотношение времен характерно для концепции тонкого фронта пламени. В реальности, если происходит горение, то за счет тепловых потерь температура всегда меньше адиабатической. Однако, если в силу каких-то причин появляется фактор, уменьшающий время τ_r при неизменном времени τ_h , то в этом случае температура фронта пламени возрастает. Эти соображения были проверены в работе [12], где анализировались возможные причины повышения температуры фронта диффузионного пламени при горении суспензии наночастиц алюминия в *n*-декане. Оказалось, что ускорение некоторых типов реакций, в частности реакций зарождения алкильных радикалов, реакций образования гидропероксидных радикалов, а также реакций их распада с образованием кетогидропероксидов и гидроксильных радикалов, вызывает увеличение температуры фронта пламени.

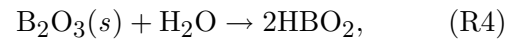
Результаты экспериментов с лазерным инициированием воспламенения показали наличие корреляции между концентрациями гидроксильного радикала OH и радикала BO₂ в ядре топливного потока. Если исходить из того, что наночастицы стабилизированы оксидом B₂O₃, то, основываясь на представлениях о воспламенении частиц бора, положенных в основу наиболее совершенной и детальной модели их горения — Princeton/Aerodyne [25, 26], можно предположить, что с высокой степенью вероятности уменьшение концентрации радикала OH* и образование оксида BO₂* в ядре топливного потока происходит в результате реакции



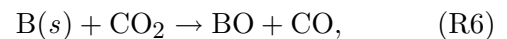
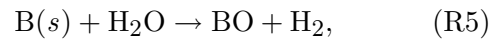
Учитывая, что при горении изопропанола в смесях с воздухом или кислородом при давлениях, близких к атмосферному, ключевую роль в процессах его окисления играют реакции изопропанола с радикалами OH и H [27]:



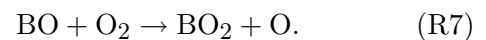
можно предположить следующий механизм ускорения окисления изопропанола наночастицами бора. На первом этапе в результате реакции оксида бора с радикалами OH, диффундирующими со стороны фронта пламени, происходит истончение оксидного слоя на наночастицах вплоть до его полного исчезновения. Истончению оксидного слоя может способствовать и реакция оксида бора с молекулами воды:



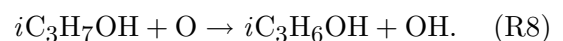
которые, как и радикалы OH, диффундируют со стороны фронта пламени. На втором этапе твердые наночастицы бора, свободные от оксидного слоя, вступают в реакцию с парами воды и молекулами диоксида углерода [26]:



с образованием активных радикалов BO. Моноксид бора BO доокисляется на фронте пламени в реакции с O₂, образуя оксид BO₂ и активный радикал O:



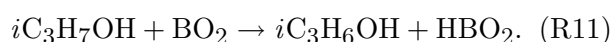
В реакции радикала O с изопропанолом образуется гидроксильный радикал OH:



Образование радикала OH происходит и в реакции VO_2 с H_2O :



Таким образом, каждый радикал VO , образовавшийся в реакциях (R5) и (R6), порождает два активных радикала OH . Активация окисления изопропанола, по всей видимости, возможна и в результате аналогичных (R2) и (R3) реакций VO и VO_2 с изопропанолом:



В предложенном выше механизме промоторования горения предполагается, что наночастицы B покрыты слоем B_2O_3 . Результаты рентгеноструктурного анализа, как уже отмечалось выше, показали наличие в наночастицах гидроксида бора $\text{B}(\text{OH})_3$, что свидетельствует о частичной гидратации оксидного слоя. Ранее о частичной гидратации оксидного слоя на поверхности наночастиц B сообщалось в работе [17]. Скорее всего, количество гидроксида в оксидном слое мало, и он не оказывает сколько-нибудь заметного влияния на процесс воспламенения. Тем не менее вопрос о степени конверсии B_2O_3 в $\text{B}(\text{OH})_3$ и то влияние, которое $\text{B}(\text{OH})_3$ оказывает на воспламенение наночастиц B , требуют отдельного изучения.

Ускорение реакций окисления $i\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$ наночастицами B — наиболее вероятная причина повышения температуры в области фронта пламени суспензии $i\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}/\text{B}$ относительно температуры в пламени чистого $i\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$. Как уже отмечалось выше, в аналогичном эксперименте [11] с диффузионным горением суспензии $n\text{C}_{10}\text{H}_{22}/\text{Al}$ при добавке наночастиц Al уже на малых расстояниях от среза сопла температура повышалась не только в области фронта пламени, но и в области топливной струи. Для объяснения этого эффекта в [12] была предложена гипотеза о резонансном поглощении теплового излучения фронта пламени агломератами наночастиц Al . В настоящем эксперименте повышение температуры топливной струи при внесении в $i\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$ наночастиц B не наблюдалось, хотя массовая доля наноразмерного B в тройной смеси $\text{N}_2/i\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}/\text{B}$ была больше, чем массовая доля наноразмерного Al в тройной смеси $\text{N}_2/n\text{C}_{10}\text{H}_{22}/\text{Al}$. Это согласуется с высказанной в [12] гипотезой, так как бор, в отличие от алюминия, не является металлом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые с использованием различных методов оптической спектроскопии проведены экспериментальные исследования диффузионного горения суспензии наночастиц бора в органическом топливе (изопропанол) в спутном потоке кислорода и импульсного лазерного фотолитического инициирования этого горения.

С применением КАРС-диагностики измерены поперечные (по отношению к оси потока и фронтам пламени) распределения температуры и относительной концентрации диффундирующих в струю топлива молекул O_2 на различных расстояниях от среза сопла горелки. Установлено, что добавка 0.5 % наночастиц бора вызывает повышение температуры фронта пламени. Разность температур постепенно возрастает с удалением от среза сопла горелки и достигает максимума ≈ 150 К на расстоянии 14 мм от среза сопла, а ниже по течению снижается, так что на расстоянии 19 мм от среза сопла ее величина не превышает 100 К, а на расстоянии 30 мм — 30 К. При этом повышение температуры в центре топливной струи при введении в изопропанол наночастиц B не наблюдается.

Горение суспензии $i\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}/\text{B}$ сопровождается, как показывает эмиссионная спектроскопия пламени, интенсивной хемиллюминесценцией радикалов VO_2^* в диапазоне длин волн 510 ÷ 570 нм, обусловливающей насыщенный зеленый цвет пламени, что указывает на воспламенение и горение наночастиц бора.

Измерения размеров зоны лазерного фотолитического инициирования воспламенения топлива в спутном потоке кислорода с применением спектроскопии ЛИФ молекул O_2^* коррелируют с КАРС-измерениями распределения относительных концентраций молекул O_2 в струе топлива и дополняют их.

В экспериментах с лазерным инициированием воспламенения топлива спектроскопия хемиллюминесценции позволяет увидеть различия в динамике изменения интенсивности свечения радикалов OH^* при воспламенении чистого $i\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$ или суспензии $i\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}/\text{B}$, а также увидеть корреляцию между концентрациями гидроксильного радикала OH и радикала VO_2 при воспламенении суспензии. Полученные данные согласуются с результатами анализа происходящих химических реакций.

Анализ показал, что наиболее вероятной причиной зарегистрированного повышения

температуры фронта пламени при горении суспензии iC_3H_7OH/B является ускорение реакций окисления изопропанола радикалами OH , O , BO и BO_2 , образующимися при горении наночастиц B . Воспламенение наночастиц, по всей видимости, обусловлено газификацией оксидной пленки B_2O_3 в реакциях с радикалами OH и молекулами H_2O , диффундирующими со стороны фронта пламени.

Таким образом, результаты исследования показывают, что наночастицы бора влияют на воспламенение и диффузионное горение суспензии iC_3H_7OH/B , и это влияние сводится не столько к повышению теплоты реакции окисления топливной смеси, сколько к ускорению процесса окисления изопропанола и, как следствие, к увеличению скорости тепловыделения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев А. М., Брайнин Б. И., Старик А. М. Анализ энергетической эффективности использования комбинированных углеводородных топлив с включением неметаллических и металлических наноконпонентов в реактивных двигателях // Неравновесные физико-химические процессы в газовых потоках и новые принципы организации горения / под ред. А. М. Старика. — М.: Торус Пресс, 2011. — С. 669–695.
2. Basha J. S., Anand R. B. Role of nanoadditive blended biodiesel emulsion fuel on the working characteristics of a diesel engine // J. Renew. Sustain. Energy. — 2011. — V. 3, N 2. — 023106. — DOI: 10.1063/1.3575169.
3. Zvereva E. R., Khabibullina R. V., Makarova A. O., Akhmetvalieva G. R., Burganova F. I., Ermolaev D. V., Zueva O. S. Modification of the rheological properties of heavy boiler fuel by adding carbon nanotubes and dehydrated carbonate sludge // Petroleum Chem. — 2019. — V. 59, N 1. — P. 106–110. — DOI: 10.1134/S0965544119010158.
4. Mehregan M., Moghiman M. Effect of aluminum nanoparticles on combustion characteristics and pollutants emission of liquid fuels — A numerical study // Fuel. — 2014. — V. 119, N 1. — P. 57–61. — DOI: 10.1016/j.fuel.2013.11.016.
5. Javed I., Baek S. W., Waheed K. Autoignition and combustion characteristics of kerosene droplets with dilute concentrations of aluminum nanoparticles at elevated temperatures // Combust. Flame. — 2015. — V. 162, N 3. — P. 774–787. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2014.08.018.
6. Yoon J., Baek S. Droplet evaporation behavior of kerosene/nano-aluminum fuels at high pressure environment // Int. J. Mater. Mech. Eng. — 2015. — V. 4. — P. 44–49. — DOI: 10.14355/ijmme.2015.04.007.
7. Luo Y., Xu X., Zou J., Zhang X. Combustion of JP-10-based slurry with nanosized aluminum additives // J. Propul. Power. — 2016. — V. 32, N 5. — P. 1–11. — DOI: 10.2514/1.B35969.
8. Palaszewski B., Jurns J., Breisacher K., Kearns K. Metallized gelled propellants combustion experiments in a pulse detonation engine // AIAA 2004-4191: 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. & Exhibit. — 2004. — DOI: 10.2514/6.2004-4191.
9. Allen C., Mittal G., Sung C., Toulson E., Lee T. An aerosol rapid compression machine for studying energetic-nanoparticle-enhanced combustion of liquid fuels // Proc. Combust. Inst. — 2011. — V. 33, N 2. — P. 3367–3374. — DOI: 10.1016/j.proci.2010.06.007.
10. Jackson D., Davidson D., Hanson R. Application of an aerosol shock tube for the kinetic studies of *n*-dodecane/nano-aluminum slurries // AIAA 2008-4767: 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. & Exhibit. — 2008. — DOI: 10.2514/6.2008-4767.
11. Smirnov V. V., Kostritsa S. A., Kobtsev V. D., Titova N. S., Starik A. M. Experimental study of combustion of composite fuel comprising *n*-decane and aluminum nanoparticles // Combust. Flame. — 2015. — V. 162, N 10. — P. 3554–3561. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2015.06.011.
12. Savel'ev A. M., Smirnov V. V., Titova N. S., Yagodnikov D. A. Diffusion combustion of *n*-decane with unpassivated aluminum nanoparticles additives: Analysis of mechanism and numerical simulation // Combust. Flame. — 2022. — V. 236, N 5. — 111761. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111761.
13. Gan Y., Lim Y., Qiao L. Combustion of nanofluid fuels with the addition of boron and iron particles at dilute and dense concentrations // Combust. Flame. — 2012. — V. 159, N 4. — P. 1732–1740. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2011.12.008.
14. Ojha P. K., Maji R., Karmakar S. Effect of crystallinity on droplet regression and disruptive burning characteristics of nanofuel droplets containing amorphous and crystalline boron nanoparticles // Combust. Flame. — 2018. — V. 188. — P. 412–427. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2017.10.005.
15. Maček A., Semple J. M. Combustion of boron particles at atmospheric pressure // Combust. Sci. Technol. — 1969. — V. 1, N 3. — P. 181–191. — DOI: 10.1080/00102206908952199.
16. Бакулин В. Н., Дубовкин Н. Ф., Котова В. Н., Сорокин В. А., Францкевич В. П., Яновский Л. С. Энергоемкие горючие для авиационных и ракетных двигателей / под ред. Л. С. Яновского. — М.: Физматлит, 2009.

17. **Karmakar S., Acharya S., Dooley K. M.** Ignition and combustion of boron nanoparticles in ethanol spray flame // *J. Propul. Power.* — 2012. — V. 28, N 4. — P. 707–718. — DOI: 10.2514/1.B34358.
18. **Weismiller M. R., Huba Z. J., Tuttle S. G., Epshteyn A., Fisher B. T.** Combustion characteristics of high energy Ti–Al–B nanopowders in a decane spray flame // *Combust. Flame.* — 2017. — V. 176. — P. 361–369. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.10.025.
19. **Young G., Sullivan K., Zachariah M. R., Yu K.** Combustion characteristics of boron nanoparticles // *Combust. Flame.* — 2009. — V. 156, N 2. — P. 322–333. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2008.10.007.
20. **Бармина Е. В., Жильникова М. И., Айы-ыжы К. О., Кобцев В. Д., Козлов Д. Н., Кострица С. А., Орлов С. Н., Савельев А. М., Смирнов В. В., Титова Н. С., Шафеев Г. А.** Экспериментальное исследование диффузионного горения суспензии наночастиц бора в изопропанолу // *Докл. АН.* — 2022. — Т. 502, № 1. — С. 10–14.
21. **Кобцев В. Д., Козлов Д. Н., Кострица С. А., Смирнов В. В., Стельмах О. М., Туманов А. А.** Лазерный спектрометрический измерительный комплекс для локальной экспресс-диагностики пламени при горении жидких углеводородных топлив // *Оптика и спектроскопия.* — 2016. — Т. 120, № 3. — С. 519–527. — DOI: 10.1134/S0030400X16020132.
22. **Kobtsev V. D., Kostritsa S. A., Pelevkin A. V., Smirnov V. V., Starik A. M., Titova N. S., Torokhov S. A., Vereshchagin K. A., Volkov S. Y.** Ignition and early stage combustion of H_2 – O_2 mixture upon the photodissociation of O_2 molecules by UV laser radiation: Experimental and numerical study // *Combust. Flame.* — 2019. — V. 200. — P. 32–43. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2018.10.038.
23. **Kobtsev V. D., Kostritsa S. A., Pelevkin A. V., Smirnov V. V., Titova N. S., Torokhov S. A., Volkov S. Y.** Photodissociation as a method to increase the ignition volume // *Combust. Flame.* — 2022. — V. 244. — P. 112222. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2022.112222.
24. **Masoumi S., Houshfar E., Ashjaee M.** Experimental investigation of the effects of passivated aluminum nanoparticles on butane flame structure // *Exp. Therm. Fluid Sci.* — 2019. — V. 100. — P. 33–48. — DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2018.08.025.
25. **Brown R. C., Kolb C. E., Rabitz H., Cho S. Y., Yetter R. A., Dryer F. L.** Kinetic model of liquid B_2O_3 gasification in a hydrocarbon combustion environment: I. Heterogeneous surface reactions // *Int. J. Chem. Kinet.* — 1991. — V. 23, N 11. — P. 957–970. — DOI: 10.1002/kin.550231102.
26. **Brown R. C., Kolb C. E., Cho S. Y., Yetter R. A., Dryer F. L., Rabitz H.** Kinetic model for hydrocarbon-assisted particulate boron combustion // *Int. J. Chem. Kinet.* — 1994. — V. 26, N 3. — P. 319–332. — DOI: 10.1002/kin.550260302.
27. **Man X., Tang C., Zhang J., Zhang Y., Pan L., Huang Z., Law C. K.** An experimental and kinetic modeling study of *n*-propanol and *i*-propanol ignition at high temperatures // *Combust. Flame.* — 2014. — V. 161, N 3. — P. 644–656. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2013.08.003.

*Поступила в редакцию 27.10.2022.
Принята к публикации 09.11.2022.*