

Визуализация фронта водородно-воздушного пламени по излучению гидропероксида

В.М. Бочарников¹, В.В. Володин¹, В.В. Голуб^{1*}, В.А. Симоненко², В.В. Стаханов²

¹Объединенный институт высоких температур Российской Академии наук, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, Москва, Россия

²Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, ул. Васильева, 13, Снежинск, Челябинская область, Россия

АННОТАЦИЯ

Современное развитие энергетики и промышленности связано с использованием водорода в качестве энергоносителя, промежуточного или побочного продукта процесса. Обеспечение безопасности является одной из приоритетных задач при разработке новых установок. В данном контексте развитие методов диагностики горения является актуальной фундаментальной и прикладной задачей. В статье предложен способ визуализации пламени с выделением излучения гидропероксида (HO_2) – промежуточного продукта горения водорода в воздухе. Проведена серия экспериментов по инфракрасной визуализации фронта пламени с использованием светофильтров для выделения излучения с длиной волны 3040 нм, соответствующей максимуму излучения гидропероксида (HO_2). Анализ результатов показывает перспективность метода для уточнения моделей химических реакций и валидации кодов численного моделирования.

Ключевые слова: водородно-воздушное пламя, инфракрасная визуализация, гидропероксид, светофильтр, излучение пламени

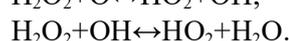
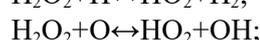
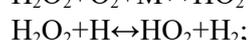
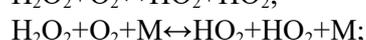
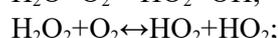
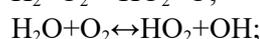
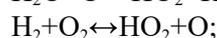
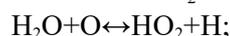
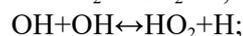
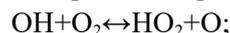
1. Введение

Водород является незаменимым промежуточным продуктом во множестве процессов в промышленности и энергетике. Производство азотных удобрений и полимеров, глубокая нефтепереработка, производство полупроводников, металлургия и пищевая промышленность потребляют до 95% производимого водорода [1]. Известно применение водорода в качестве топлива серийных и перспективных реактивных двигателей [2]. В последние десятилетия ведутся активные работы по внедрению водорода в качестве энергоносителя в рамках мероприятий по снижению углеродного следа энергетики [3].

Разработка новых и модернизация проектов использования водорода требуют тщательной проработки вопросов эффективности и безопасности, что связано с верификацией моделей и валидацией кодов численного моделирования [4]. На сегодняшний день экспериментальные данные об объемных параметрах в области горения

получаются с использованием теневой визуализации [5], отражающей изменение оптической плотности среды на фронте пламени, инфракрасной съемки в диапазоне 2700–2800 нм [6], показывающей распределение нагретых паров воды. Визуализация пространственного распределения промежуточных продуктов горения ограничена съемкой лазерно-индуцированного свечения гидроксила (OH) в диапазоне 308–311 нм [5].

Одним из промежуточных продуктов реакции окисления водорода является гидропероксид (HO_2) [7]. Реакции с участием гидропероксида, приведенные в работе [8], следующие:



*Ответственный автор

E-mail: victor.v.golub@gmail.com

Поскольку гидропероксид присутствует только в области протекающей химической реакции, выделение из общего излучения пламени диапазона 3040-3060 нм [9], соответствующей переходу из первого колебательного в основное состояние валентной связи ОН, может быть полезно для получения визуальной информации о зоне химической реакции и состоянии гидропероксида для валидации кинетических схем численного моделирования.

2. Предпосылки и подход

Изменение интенсивности излучения на длине волны λ рассчитывается по следующей формуле:

$$I^\lambda = I_0^\lambda \cdot 10^{-(k_\lambda l + D_p)}. \quad (1)$$

Зависимости k_λ от длины волны излучения для использованных в работе светофильтров представлены на рис. 1, данные взяты из справочника [10].

Значения D_p из справочника [10] приведены в таблице 1.

Излучение вблизи 2700 нм – равновесное излучение воды при колебательных переходах 001→000 и 100→000 [12]. Интенсивность излучения пропорциональна объемной скорости деактивации и энергии фотона. Скорость деактивации складывается из скоростей спонтанной и столкновительной деактиваций, т.е. перехода молекулы из возбужденного в основное состояние.

$$\frac{dn_{H_2O}^\lambda}{dt} \alpha - \frac{1}{\tau_{\lambda d}} n_{H_2O}^\lambda - W_{\lambda \rightarrow 000} n_{H_2O}^\lambda n_{H_2O} \quad (2)$$

где: $n_{H_2O}^\lambda$ – концентрация возбужденных молекул воды; n_{H_2O} – концентрация молекул воды; $\tau_{\lambda d}$ – константа времени спонтанной деактивации; $W_{\lambda \rightarrow 000}$ – константа скорости столкновительной деактивации; индекс λ показывает длину волны излучения соответствующего перехода.

Таблица 1. Значения D_p для различных фильтров

Светофильтр	D_p
БС14	0,058
ЖС20	0,040
ЗС11	0,041
ПС11	0,039

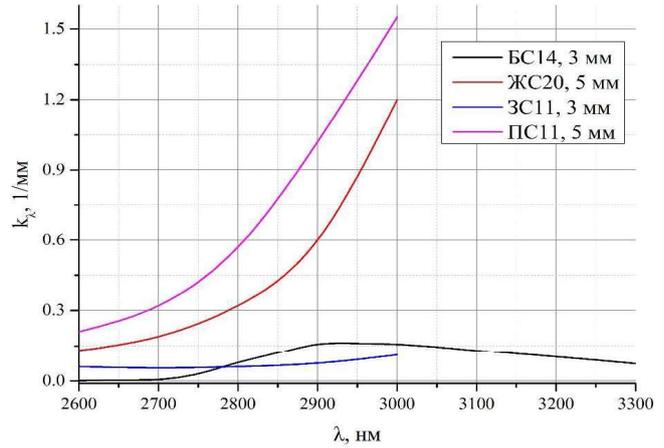


Рис. 1. Зависимости k_λ от длины волны для использованных в работе светофильтров.

Время установления близких к равновесным концентраций паров воды с состояниями 001 и 100 рассчитано в работе [12], оно на несколько порядков меньше характерных времен процессов горения. В этом случае, равновесная концентрация каждого из колебательно возбужденных состояний может быть рассчитана из уравнения баланса заселения возбужденных колебательных уровней воды.

$$\frac{1}{\tau_{\lambda a}} (n_{H_2O} \exp(-\frac{hc}{\lambda k_B T}) - n_{H_2O}^\lambda) = \frac{1}{\tau_{\lambda d}} n_{H_2O}^\lambda + W_{\lambda \rightarrow 000} n_{H_2O}^\lambda n_{H_2O}, \quad (3)$$

где: $\tau_{\lambda a}$ – константа времени активации; h – постоянная Планка; c – скорость света в вакууме; k_B – постоянная Больцмана; T – температура среды.

Излучение возникает при спонтанной или вынужденной деактивации молекулы воды. Для каждого перехода можно записать вклад в суммарное излучение.

$$I_0^\lambda \alpha n_{H_2O} \frac{1 + \tau_{\lambda d} W_{\lambda \rightarrow 000} n_{H_2O}}{\tau_{\lambda d} + \tau_{\lambda a} + \tau_{\lambda a} \tau_{\lambda d} W_{\lambda \rightarrow 000} n_{H_2O}} \exp\left(-\frac{hc}{\lambda k_B T}\right). \quad (4)$$

Исходная суммарная интенсивность на длинах волн 2660 и 2740 нм (обозначим ее I_0^{2700}) составит:

Подставляя в уравнения (4) и (5) значения констант из работы [13], можно получить относительные доли интенсивности излучения с длинами волн 2660 и 2740 нм в равновесном излучении паров воды (табл. 2).

$$I_0^{2700} \alpha n_{H_2O} \left[\frac{1 + \tau_{\lambda 1 d} W_{\lambda 1 \rightarrow 000} n_{H_2O}}{\tau_{\lambda 1 d} + \tau_{\lambda 1 a} + \tau_{\lambda 1 a} \tau_{\lambda 1 d} W_{\lambda 1 \rightarrow 000} n_{H_2O}} \exp\left(-\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) + \frac{1 + \tau_{\lambda 2 d} W_{\lambda 2 \rightarrow 000} n_{H_2O}}{\tau_{\lambda 2 d} + \tau_{\lambda 2 a} + \tau_{\lambda 2 a} \tau_{\lambda 2 d} W_{\lambda 2 \rightarrow 000} n_{H_2O}} \exp\left(-\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) \right]. \quad (5)$$

Таблица 2. Константы переходов и относительные доли интенсивности излучения

λ , нм	2660	2740
$\tau_{\lambda d}$, с	$3,00 \cdot 10^{-2}$	$5,90 \cdot 10^{-1}$
$\tau_{\lambda a}$, с	$7,60 \cdot 10^{-9}$	$7,60 \cdot 10^{-6}$
$W_{\lambda \rightarrow 000}$, см ³ /с	$1,50 \cdot 10^{-13}$	$1,50 \cdot 10^{-11}$
I_0^{λ}/I_0^{2700}	$1,23 \cdot 10^{-2}$	$9,88 \cdot 10^{-1}$

По формуле (1) можно вычислить относительную долю излучения, проходящую через фильтр. Результаты расчета представлены в таблице 3.

Таблица 3. Доля излучения, проходящая через фильтр

Фильтр	Длина волны, нм	
	2700	3040
БС14, 3 мм	$7,37 \cdot 10^{-1}$	$3,16 \cdot 10^{-1}$
ЖС20, 5 мм	$5,72 \cdot 10^{-2}$	$5,75 \cdot 10^{-8}$
ЗС11, 3 мм	$6,14 \cdot 10^{-1}$	$3,86 \cdot 10^{-1}$
ПС11, 5 мм	$7,64 \cdot 10^{-3}$	$1,42 \cdot 10^{-9}$

Таким образом, имея интенсивности излучения без фильтра и через фильтры с известными характеристиками, путем поэлементного вычитания можно выделить излучение с длиной волны 3040 нм.

3. Экспериментальная установка

Для проверки предложенного способа визуализации области химической реакции были проведены эксперименты с диффузионным ламинарным стабильным горением струи водорода в воздухе. С целью регистрации инфракрасного (ИК) излучения горячей водородной струи через светофильтры и выделения излучения с определенной длиной волны использовали экспериментальную установку, представленную на рис. 2.

Горячая струя водорода (1 на рис. 2) истекала из стальной трубки с внутренним диаметром 0,8 мм и внешним диаметром 1,2 мм. Через газовую магистраль в трубку поступал водород марки 4,0 производства «БК Групп». Чистота водорода была не менее 99,99 об.%. Содержание примесей кислорода, азота и паров воды не превышало 0,01 об.%. С помощью контроллера Bronkhorst F-201A/V (2 на рис. 2) из баллона (3 на рис. 2) устанавливали постоянный расход 0,5 л/мин. Контроллер расхода Bronkhorst F-201A/V управлялся с помощью программного обеспечения FlowDDE,

предоставленного производителем, что обеспечило погрешность расхода газа не более 10%, при этом различие значения расхода от эксперимента к эксперименту не превышало 1%. Визуализация горения водородной струи производилась с помощью инфракрасной камеры Infracam ImageIR 8300 (4 на рис. 2) с частотой кадров 300 к/с с разрешением 640×512 точек, оснащенной объективом с фокусным расстоянием 50 мм. Инфракрасная камера находилась на расстоянии 90 см от объекта. Поле обзора составляло 172,8×138,24 мм². Пространственное разрешение изображения – 0,27 мм. Для управления инфракрасной камерой и экспорта изображений в электронные таблицы применялось программное обеспечение от производителя IRBIS3 Professional, обеспечивающее погрешность измерения плотности мощности излучения до 1%.

Чтобы выделить излучение с соответствующей длиной волны использовали светофильтры БС14, ЖС20, ЗС11 и ПС11 (5 на рис. 2), установленные перед объективом. Для регистрации изображений, управления контроллером расхода и обработки полученных изображений использовался компьютер (6 на рис. 2).

Поскольку к полученным табличным данным применялись только простые арифметические операции, погрешность эксперимента складывается из погрешностей состава водорода, повторяемости расхода газа и измерения плотности мощности излучения. По правилу свертки экспериментальных данных [11], общая погрешность эксперимента не превышает 1,5%.

4. Результаты визуализации

В результате визуализации получены поля проекции интенсивности излучения пламени на матрицу ИК камеры в Вт/м². На рис. 3 представлен ИК-снимок пламени без фильтров.

Рис. 3 показывает классическую картину присоединенного ламинарного пламени, достаточно полно описанного в работах [14-16]. В нижней части видна область смешения и химической реакции. В верхней части происходит остывание продуктов реакции, что сопровождается падением интенсивности излучения. В области реакции максимальное значение интенсивности достигает 357 Вт/м².

Фильтр БС14 пропускает 73,7% излучения воды и 31,6% излучения гидропероксида (рис. 4). В области реакции максимальное значение интенсивности достигает 357 Вт/м².

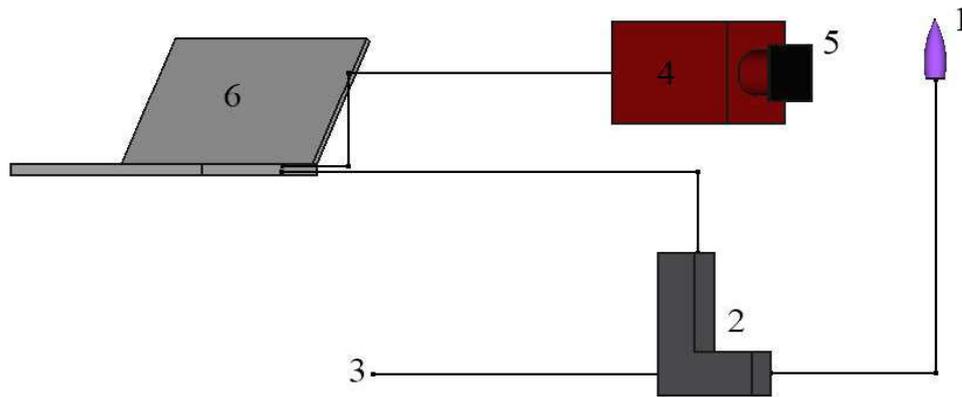


Рис. 2. Экспериментальная установка: 1 – водородное пламя; 2 – контроллер расхода газа; 3 – ввод водорода; 4 – ИК камера Infratec ImageIR 8300; 5 – светофильтр; 6 – компьютер.

Фильтр ЖС20 пропускает 5,7% излучения воды и практически полностью поглощает излучение гидропероксида (рис. 5). В области реакции максимальное значение интенсивности достигает 31 Вт/м^2 .

Фильтр ЗС11 пропускает 61,4% излучения воды и 38,6% излучения гидропероксида (рис. 6). В области реакции максимальное значение интенсивности достигает 256 Вт/м^2 .

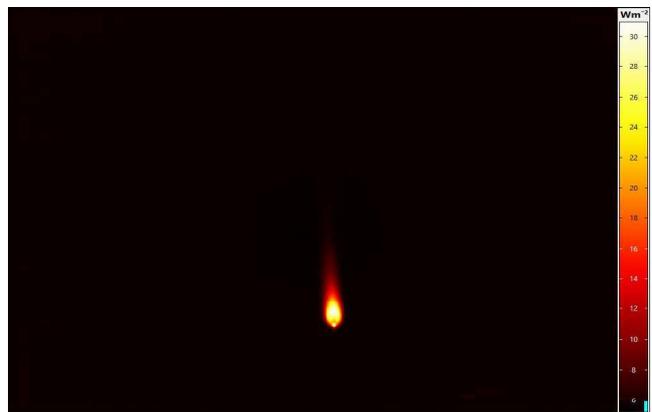


Рис. 5. ИК-снимок пламени с фильтром ЖС20.

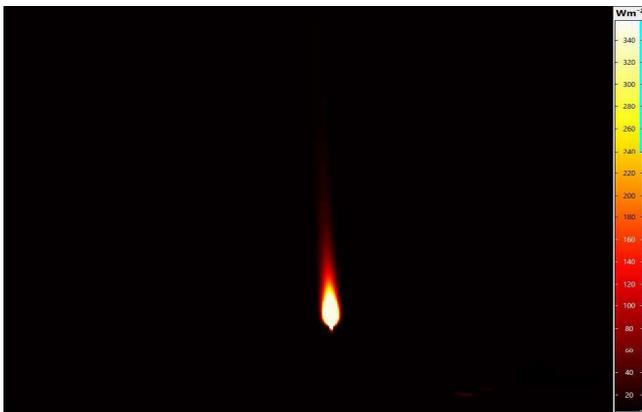


Рис. 3. ИК-снимок пламени без фильтров.

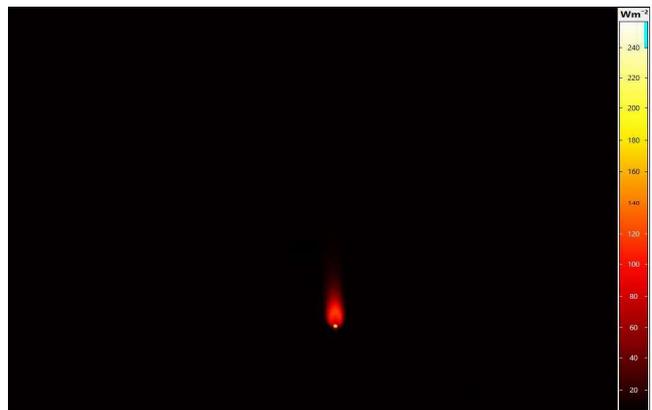


Рис. 6. ИК-снимок пламени с фильтром ЗС11.

Фильтр ПС11 пропускает 0,8% излучения воды и практически полностью поглощает излучение гидропероксида (рис. 7). В области реакции максимальное значение интенсивности достигает $17,3 \text{ Вт/м}^2$.

5. Результаты обработки

В процессе обработки изображения, представленные в пункте «Результаты визуализации»,

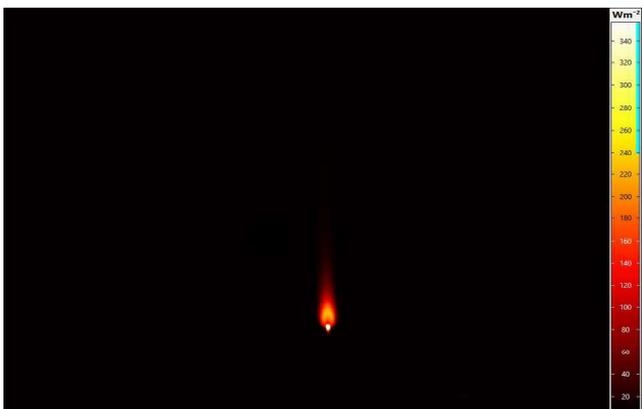


Рис. 4. ИК-снимок пламени с фильтром БС14.



Рис. 7. ИК-снимок пламени с фильтром ПС11.

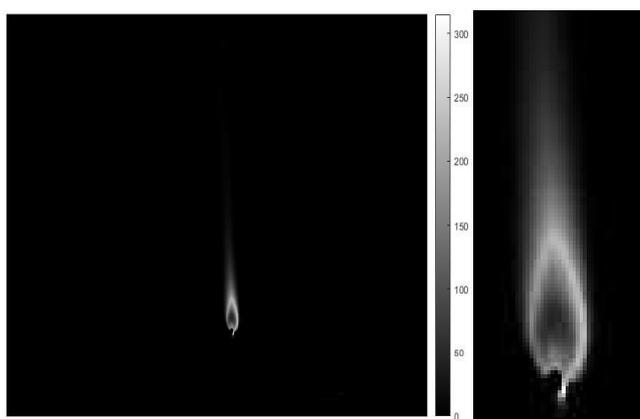


Рис. 8. Интенсивность излучения пламени, полученная вычитанием интенсивности излучения без фильтра и через фильтр БС14. Слева – изображение в исходном масштабе, справа – область пламени, увеличенная в 5 раз.

были переведены в таблицы 640×512 элементов, где число в каждой ячейке равнялось интенсивности излучения в соответствующей точке. Далее, из таблицы, соответствующей изображению без фильтра, поэлементно вычиталась таблица, соответствующая изображению с фильтром, поделенная на отношение интенсивности проходящего излучения к исходной (таблица 3). Результаты представлены на рисунках ниже.

На рис. 8 видна узкая область повышенной интенсивности излучения, повторяющая форму фронта пламени, показанную в работах [14-15]. Яркая область в нижней части изображения может быть вызвана тепловым излучением стальной трубки, которое имеет широкий спектр.

На рис. 9 показан результат вычитания интенсивности излучения через фильтр ЖС20 из интенсивности излучения без фильтра. Как и в случае с фильтром БС14, видны яркая область фронта пламени, нагретая трубка и «хвост» догорания в верхней части.

На рис. 10 показан результат вычитания интенсивности излучения через фильтр ЗС11 из ин-

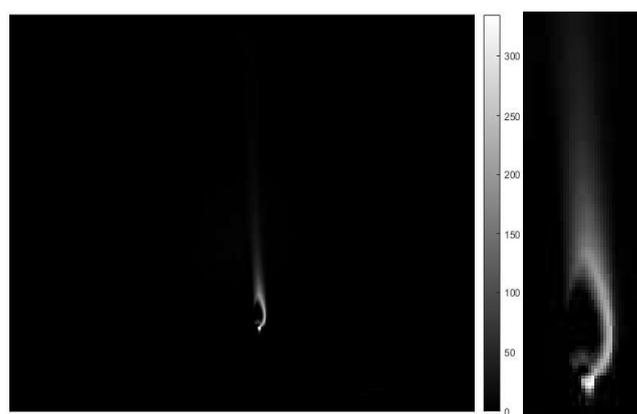


Рис. 9. Интенсивность излучения пламени, полученная вычитанием интенсивности излучения без фильтра и через фильтр ЖС20. Слева – изображение в исходном масштабе, справа – область пламени, увеличенная в 5 раз.

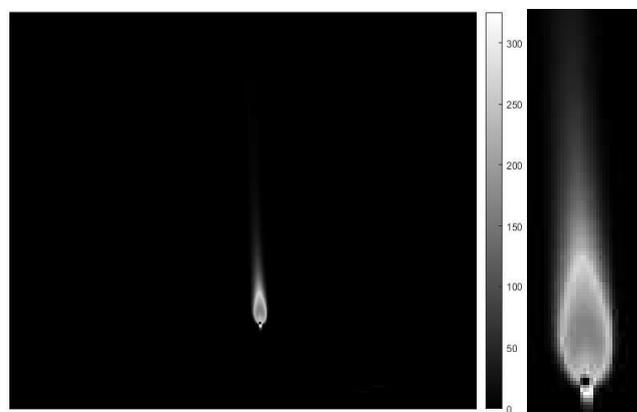


Рис. 10. Интенсивность излучения пламени, полученная вычитанием интенсивности излучения без фильтра и через фильтр ЗС11. Слева – изображение в исходном масштабе, справа – область пламени, увеличенная в 5 раз.

тенсивности излучения без фильтра. Видно яркое свечение в при осевой области струи. Это может быть вызвано несоответствием характеристик использованного фильтра и справочных данных. Тем не менее, явно выделяется повышение интенсивности излучения в области химической реакции, что демонстрирует возможность выделения излучения гидропероксида для визуализации области химической реакции.

На рис. 11 показан результат вычитания интенсивности излучения через фильтр ПС11 из интенсивности излучения без фильтра. Видна яркая область в нижней части изображения, которая соответствует нагретой стальной трубке, и слабый след горячей струи, который по форме сильно отличается от форм пламени на рис. 8-10. В связи с малым коэффициентом пропускания излучения с длинами волн от 2600 нм и выше, использование фильтра ПС11 для выделения излучения гидропероксида сопровождается большой погрешностью.

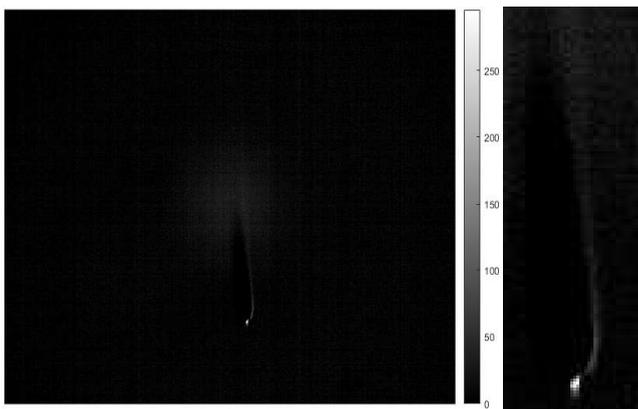


Рис. 11. Интенсивность излучения пламени, полученная вычитанием интенсивности излучения без фильтра и через фильтр ПС11. Слева – изображение в исходном масштабе, справа – область пламени, увеличенная в 5 раз.

5. Выводы

- Предложен способ получения полей излучения гидропероксида (3040 нм) из ИК- фотографий пламени и продуктов сгорания.
- По справочным данным подобраны светофильтры БС14, ЖС20, ЗС11 и ПС11, которые могут быть использованы для выделения излучения гидропероксида.
- Проведена серия экспериментов по визуализации фронта пламени с использованием указанных светофильтров.
- Результаты экспериментов обработаны в соответствии с предложенным способом.
- показано, что с использованием светофильтров БС14, ЖС20 и ЗС11 можно выделить излучение гидропероксида и измерить его интенсивность.
- В связи с большой разницей в пропускании излучения воды и гидропероксида наиболее перспективен для конструирования методики фильтр ЖС20.
- Применение фильтра ПС11 нецелесообразно из-за малого пропускания излучения паров воды.

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина».

Список литературы

[1]. Ajayi-Oyakhire O. Hydrogen – Untapped energy? // IGEM Technical Report N 214001. – 2012. – P. 47.

- [2]. Жапбасбаев У.К., Макашев Е.П. Некоторые данные сверхзвукового горения неперемешанных газов в расширяющихся каналах // Горение и плазмохимия. – 2015. – №1. – С. 3-10.
- [3]. Арутюнов В.С. Проблемы и вызовы водородной энергетики // Горение и плазмохимия. – 2021. – №4. – С. 245-255.
- [4]. Арутюнов В.С., Трошин К.Я., Беляев А.А., Арутюнов А.В., Никитин А.В., Стрекова Л.Н. Влияние состава газовых смесей на задержку их самовоспламенения и нормальную скорость пламени // Горение и плазмохимия. – 2020. – №2. – С. 61-80.
- [5]. Gutmark E., Parr T.P., Hanson-Parr D.M., Schadow K.C. Simultaneous OH and Schlieren visualization of premixed flames at the lean blow-out limit // Experiments in Fluids. – 1991. – Vol. 12. – P. 10-16.
- [6]. Kim W.K., Mogi T., Dobashi R. Flame acceleration in unconfined hydrogen/air deflagrations using infrared photography // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2013. – Vol. 26. – P. 1501-1505.
- [7]. Тальрозе В.Л., Поройкова А.И. Радикал HO_2 в работах В. В. Воеводского и в наши дни. Результаты и проблемы // Успехи химии. – 1978. – №6. – С. 955-966.
- [8]. Konnov A.A. Remaining uncertainties in the kinetic mechanism of hydrogen combustion // Combustion and Flame. – 2008. – Vol. 152. – P. 507-528.
- [9]. U.S. Secretary of Commerce on behalf of the United States of America. NIST Chemistry WebBook, SRD 69. <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?Source=1997FIN%2FRAM304&Mask=800>.
- [10]. Варгин В.В., Вейнберг Т.И. Каталог цветного стекла. – М.: Машиностроение, 1967. – 63 с.
- [11]. Лосев С.А. О свертке информации, получаемой в экспериментах на ударных трубах // Научные труды. Институт Механики МГУ. – 1973. – №21. – С. 3-21.
- [12]. Bivol G., Gavrikov A., Golub V., Elyanov A., Volodin V. 3D surface of an unstable hydrogen–air flame // Experimental Thermal and Fluid Science – 2021. – Vol. 121. – P. 110265.
- [13]. Ребров А.К., Чекмарев С.Ф., Чернявина Н.М. Колебательная релаксация и излучение H_2O при ударном нагреве смеси газов низкой плотности // Прикладная механика и техническая физика. – 1982. – № 3. – С. 27-32.
- [14]. Шмаков А.Г., Козлов В.В., Литвиненко М.В., Литвиненко Ю.А. Изучение пределов устойчивого горения диффузионного пламени микроструи водорода, истекающей из круглого микросопла, при введении в водород или воздух инертных и реагирующих газов // Сибирский физический журнал. – 2019. – №3. – С.64-75.
- [15]. Кочергин Д.О., Абдрахманов Р.Х., Лукашов В.В., Терехов В.В. О структуре прямого и

обращенного диффузионного водородо-воздушного пламени // Научный вестник НГТУ. – 2016. – №1. – С. 195-204.

- [16]. Hutny W.P., Lee G.K. Improved radiative heat transfer from hydrogen flames // International Journal of Hydrogen Energy. – 1991. – Vol. 16. – P. 47-53.

Reference

- [1]. Ajayi-Oyakhire O (2012) Tech. Rep. Institution of Gas Engineers and Managers N 214001: 47.
- [2]. Zhabbasbaev UK, Makashev EP (2015) Combustion and plasma chemistry 13: 3-10. (In Russian). <https://cpc-journal.kz/index.php/cpcj/article/view/298>
- [3]. Arutyunov VS (2021) Combustion and plasma chemistry 19: 245-255. (In Russian). <https://doi.org/10.18321/cpc462>
- [4]. Arutyunov VS, Troshin KYa, Belyaev AA, Arutyunov AV, Nikitin AV, Strekova LN (2020) Combustion and plasma chemistry 18: 61-80. (In Russian). <https://doi.org/10.18321/cpc349>
- [5]. Gutmark E, Parr TP, Hanson-Parr DM, Schadow KC (1991) Experiments in Fluids. 12: 10-16. <https://doi.org/10.1007/BF00226560>
- [6]. Kim WK, Mogi T, Dobashi R (2013) Journal of Loss Prevention in the Process Industries 26: 1501-1505. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.09.009>
- [7]. Talroze VL, Poroikova AI (1978) Advances in chemistry [Uspekhi khimii]. 47: 955-966. (in Russian)
- [8]. Konnov AA (2008) Combustion and Flame 152: 507-528. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2007.10.024>
- [9]. U.S. Secretary of Commerce on behalf of the United States of America. NIST Chemistry WebBook, SRD 69. (2023) Hydroperoxy radical <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?Source=1997FIN%2FRAM304&Mask=800>.
- [10]. Vargin VV, Weinberg TI (1967) Colored glass catalog [Katalog tsvetnogo stekla] Publishing house «Mechanical Engineering», Moscow. (in Russian)
- [11]. Losev SA (1976) Scientific report of Institute of Mechanics MSU [Nauchnye trudy. Institut Mekhaniki MGU]. 43: 3-21. (in Russian)
- [12]. Bivol G, Gavrikov A, Golub V, Elyanov A, Volodin V (2021) Experimental Thermal and Fluid Science 121: 110265. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2020.110265>
- [13]. Rebrov AK, Chekmarev SF, Chernyavina NM (1982) Journal of Applied Mechanics and Technical Physics [Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika]. 3: 27-32. (in Russian). <https://www.sibran.ru/upload/iblock/023/023f46a4b8c3d1a3469f52b3e71afd73.pdf>

- [14]. Shmakov AG, Kozlov VV, Litvinenko MV, Litvinenko YA (2019) Siberian Journal of Physics [Sibirskii fizicheskii zhurnal]. 14: 64-75. (in Russian). <https://doi.org/10.25205/2541-9447-2019-14-3-64-75>
- [15]. Kochergin DO, Abdrakhmanov RH, Lukashov VV, Terekhov VV (2016) Science Bulletin of the NSTU [Nauchnyj vestnik NGTU]. 62: 195-204. (in Russian). <https://doi.org/10.17212/1814-1196-2016-1-195-204>
- [16]. Hutny WP, Lee GK (1991) International Journal of Hydrogen Energy 16: 47-53. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(91\)90059-R](https://doi.org/10.1016/0360-3199(91)90059-R)

Visualization of the hydrogen-air flame front based on the emission of hydroperoxyl

V.M. Bocharnikov¹, V.V. Golub¹,
V.V. Volodin¹, V.A. Simonenko², V.V. Stakhanov²

¹Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences, 13 bld. 2, Izhorskaya st., Moscow, Russia

²Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of technical Physics, 13, Vasil'eva st., Snezhinsk, Chelyabinsk region, Russia

ABSTRACT

Modern development of energy and industry is associated with the use of hydrogen as an energy carrier, an intermediate or by-product of the process. Ensuring safety is one of the priorities when developing new objects. In this context, the development of combustion diagnostic methods is an urgent fundamental and applied task. The article proposes a method for visualizing a flame with the release of radiation from hydroperoxyl (HO₂), an intermediate product of the combustion of hydrogen in air. A series of experiments on infrared visualization of the flame front was carried out using light filters to isolate radiation with a wavelength of 3040 nm, corresponding to the maximum emission of hydroperoxyl (HO₂). Analysis of the results shows the promise of the method for refining chemical reaction models and validating numerical simulation codes.

Keywords: hydrogen-air flame, infrared imaging, hydroperoxyl, light filter, flame radiation

Гидропероксидтің шығарылуына негізделген сутегі-ауа жалынының алдыңғы бөлігін визуализациялау

В.М. Бочарников¹, В.В. Володин¹, В.В. Голуб¹,
В.А. Симоненко², В.В. Стаханов²

¹Ресей Ғылым Академиясының Біріккен Жоғары температура институты, Ижорская кө-сі, 13 үй, 2 корпус, Мәскеу, Ресей

²Ресей Федералдық ядролық орталығы – Академик Е.И. Забабахин атындағы Бүкілресейлік ғылыми-зерттеу техникалық физика институты, Васильева к-сі, 13, Снежинск, Челябині облысы, Ресей

АННОТАЦИЯ

Энергетика мен өнеркәсіптің қазіргі заманғы дамуы сутекті энергия тасымалдаушы, процестің аралық немесе жанама өнімі ретінде пайдаланумен байланысты. Жаңа қондырғыларды әзірлеу кезінде қауіпсіздікті қамтамасыз ету басымдық болып табылады. Бұл тұрғыда жануды диагностикалау әдістерін дамыту өзекті іргелі және қолданбалы міндет болып табылады. Мақалада сутегінің ауадағы жануының аралық өнімі гидропероксидтен (HO_2) сәуле шығарумен жалынды визуализациялау әдісі ұсынылған. Жалын фронтын инфрақызыл визуализациялау бойынша бірқатар эксперименттер гидропероксидтің (HO_2) максималды эмиссиясына сәйкес келетін толқын ұзындығы 3040 нм сәулеленуді оқшаулау үшін жарық сүзгілерін қолдану арқылы жүргізілді. Нәтижелерді талдау химиялық реакция модельдерін нақтылау және сандық модельдеу кодтарын тексеру әдісінің уәдесін көрсетеді.

Түйін сөздер: сутегі-ауа жалыны, инфрақызыл бейнелеу, гидропероксид, жарық сүзгісі, жалын сәулесі