

СТРУКТУРА ДИФфуЗИОННЫХ ПРОПИЛЕНОВЫХ САЖИСТЫХ И БЕССАЖЕВЫХ ПЛАМЕН ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ЛАЗЕРОМ

Ч. Б. Ли¹, В. Ли², К. Ч. О¹, Х. Д. Шин³, Д.-К. Ён⁴

¹Центр EPRC, Отделение научно-технических исследований KATECH, 74 Ёнгюн, Пунгзе, Чонан, Чунгнам, 330-913, Республика Корея, cblee@katech.re.kr

²Отделение механики, Университет Данкок, Республика Корея

³Отделение механики, KAIST, Республика Корея

⁴Отделение механики, Университет Хансун, Республика Корея

Для изучения влияния излучения сажи проведено экспериментальное исследование изменения структуры пропиленовых диффузионных пламен под воздействием излучения лазера. Объемная доля сажи и температура пламени/сажи измерялись методом лазерного поглощения и двухцветовой пирометрии. Наблюдались переходы от бессажевого пламени к сажистому и наоборот, в зависимости от положения пучка лазера. Изменение структуры можно объяснить следующими процессами. При воздействии лазерным пучком на область образования сажи (нижняя часть пламени) температура частиц сажи повышается благодаря поглощению энергии лазера, что способствует образованию сажи и росту ее локальной объемной доли. Большое количество сажи увеличивает радиационные теплотери и в конечном итоге снижает температуру пламени вниз по течению. В результате процесс окисления сажи подавляется, и бессажевое пламя переходит в сажистое. При воздействии лазерного излучения на область конкуренции процессов образования и окисления сажи либо на зону окисления (верхняя часть пламени) температура сажи возрастает и в большинстве случаев это способствует ее окислению. Снижение количества сажи уменьшает радиационные потери и поддерживает относительно высокую температуру пламени по сравнению с температурой в отсутствие лазерного излучения. В результате процесс окисления сажи еще более усиливается, и в конечном итоге осуществляется переход от сажистого пламени к бессажевому.

Ключевые слова: лазерный нагрев, переход от сажистого пламени к бессажевому, метод поглощения излучения, двухцветовая пирометрия, температура пламени/сажи.

ВВЕДЕНИЕ

Расход топлива и температура струйного пламени являются главными параметрами, определяющими процесс образования сажи. К примеру, возрастание расхода топлива ведет к увеличению выхода сажи, что способствует снижению температуры вследствие роста радиационных тепловых потерь [1–3]. Далее процесс окисления сажи подавляется, и в конечном итоге сажа выделяется в окружающее пространство. Подобно печам, горелки с прием-

лемой нормой выхода сажи могут способствовать теплообмену, и если удастся управлять процессами образования и окисления сажи, то это позволит не только минимизировать выделение сажи, но и повысить эффективность теплообмена. Как упоминалось выше, из-за радиационных тепловых потерь поля температуры и структура пламени меняются, но вследствие экспериментальных трудностей данный процесс малоизучен.

Известно, что первичная сажа образуется вследствие быстрой полимеризации предшественников сажи, таких как перенасыщенные полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), возникающие в результате термического пиролиза топлива [4, 5]. Предшественники сажи — радикалы $C_{2n}H_2$ и ПАУ быстро изменяются подобно прозрачным исходным частицам, аналогичным смоле и жидкостям, плотность которых 1.2 мг/мл, а отношение C/H равно 2. Коэффициент поглощения первичной

Chun Beom Lee¹, Wonnam Lee², Kwang Chul Oh³, Hyun Dohg Shin³, Jae-Kun Yoon⁴.

¹EPRC Center of R&D Division KATECH, Pungse, Chonam, Chungnam 330-912, Republic of Korea.

²Department of Mechanical Engineering, Dankook University, Republic of Korea.

³Department of Mechanical Engineering, KAIST, Republic of Korea.

⁴Department of Mechanical Engineering, Hansung University, Republic of Korea.

сажи незначителен. Далее малые исходные частицы превращаются в большие частицы и агрегаты, а поскольку плотность карбонизированной частицы сажи с нерегулярной агрегированной морфологией, подобной струне, составляет 1.8 мг/мл при коэффициенте поглощения 0.6 и отношении $C/N \approx 6 \div 8$, то все это приводит к существенным радиационным потерям из-за большой плотности излучения пламени [6, 7].

Согласно расчетным исследованиям коаксиального ламинарного диффузионного метанового пламени, разбавленного аргоном, при отсутствии радиационных потерь максимальная температура пламени растет на 122 К, максимальная объемная доля сажи повышается в три раза, а концентрация ацетилена и бензола — на 45 и 22 % соответственно [8, 9].

Проведенные в [10] расчеты коаксиального ламинарного этиленового пламени с использованием модели оптически тонкой поглощающей среды показали, что максимальная температура на 120 К ниже действительной температуры пламени. Такое расхождение обусловлено изменением исходных граничных температурных условий (температура изменяется примерно на 100 К вследствие кондуктивных и радиационных потерь [10]).

Из рис. 1 видно, что изменение граничных условий, особенно температуры поверхности печи, которая влияет на радиационные потери, может изменить структуру пламени. Но такое поведение пламени является следствием ряда сложных эффектов, таких как повышение начальных температур топлива и спутного потока воздуха, изменение процессов образования и/или окисления сажи из-за снижения радиационных потерь. Кроме того, изменение радиационного теплообмена оказывает влияние на температуру пламени, и это изменяет процессы образования и/или окисления сажи. В результате изменяется распределение сажи в пламени, что, в свою очередь, влияет на радиационный теплоперенос.

В данной работе экспериментально исследовалось изменение структуры спутных пропиленовых диффузионных пламен под воздействием лазерного излучения с целью изучения влияния излучения сажи на пламя. Данные исследования позволяют оценить влияние радиационного теплопереноса на процессы образования и окисления сажи.

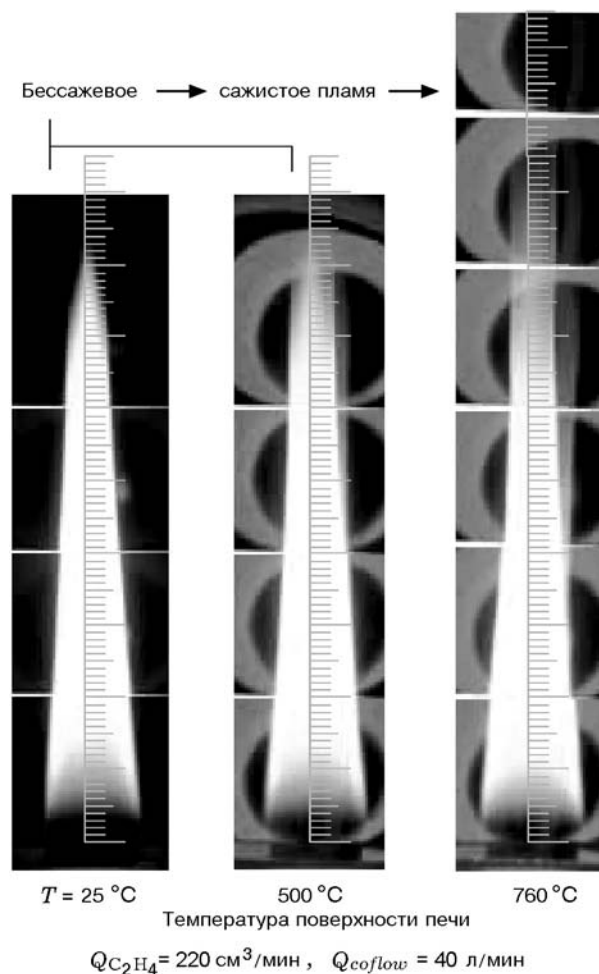


Рис. 1. Переход от бессажевого к сажистому пламени в зависимости от температуры поверхности печи

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ

Для формирования устойчивого пламени в экспериментах с лазерным нагревом применялась стандартная горелка [11], состоящая из внутренней топливной трубки (внутренний диаметр 8 мм), окруженной внешней трубкой (диаметром 76 мм) для подачи воздуха. Расход топлива (пропилена) составлял 0.68 и 0.71 нсм³/с (при нормальных условиях). Локальную объемную долю сажи определяли методом лазерного поглощения с использованием трехточечной инверсии Абеля. Схема экспериментальной установки показана на рис. 2. Многоволновый аргоновый лазер (Spectra Physics; Stabilite 2017-05) и комбинация из цилиндри-

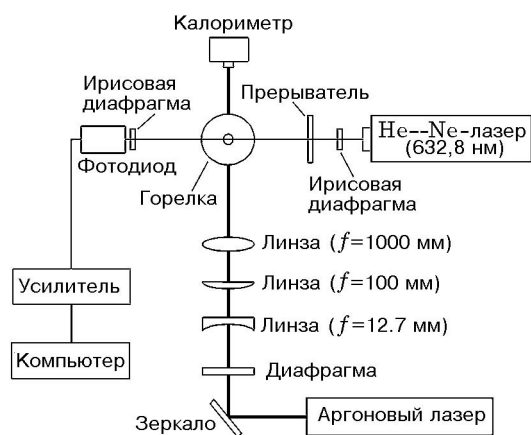


Рис. 2. Схематическое изображение экспериментальной установки для лазерного нагрева и поглощения

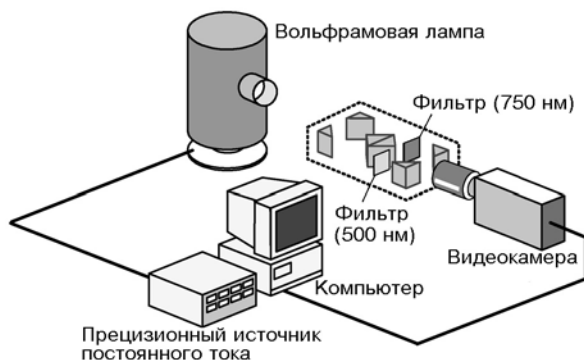


Рис. 3. Экспериментальная установка для измерения температуры пламени/сажи

ческих и сферических линз создают плоский лазерный пучок, являющийся источником нагрева определенного горизонтального сечения пропиленового ламинарного диффузионного пламени. Плоскость лазерного нагрева находилась на расстоянии $h = 7, 13$ либо 19 мм над уровнем среза горелки в экспериментах как с бессажевым пламенем (расход топлива 0.68 нсм³/с), так и в случае сажистого пламени (расход топлива 0.71 нсм³/с). Объемная доля сажи и температура частиц сажи измерялись методами поглощения лазерного излучения и двухцветовой пирометрии соответственно. Затем измеренные значения сравнивались с теми, что были получены для тех же пламен без лазерного нагрева.

Метод двухцветовой пирометрии, использованный в данной работе, основан на хорошо

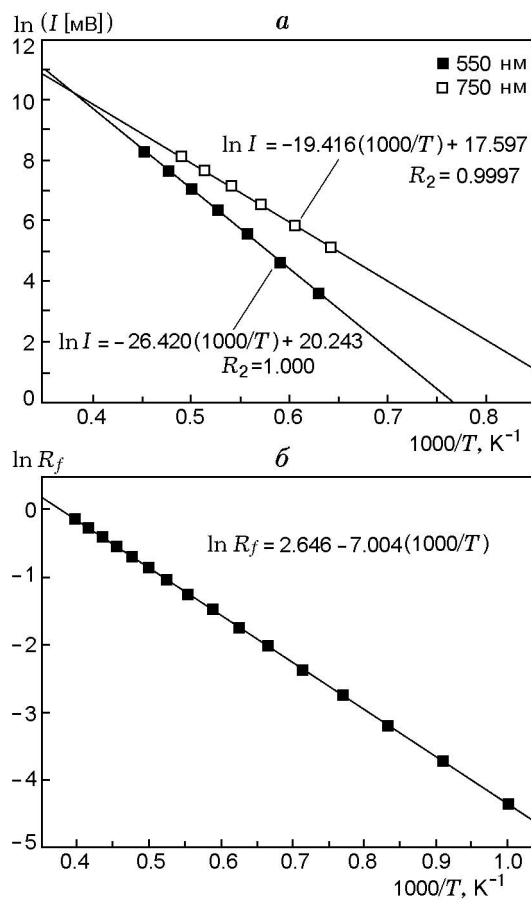


Рис. 4. Калибровочные кривые для измерения температуры пламени/сажи методом двухцветовой пирометрии:

a — зависимость интенсивности сигнала от температуры вольфрамовой лампы, R_2 — коэффициент корреляции; *b* — соотношение сигналов в зависимости от температуры

известном методе коэффициента КЛ, подробно описанном в работе [12]. Схема измерений показана на рис. 3. Интенсивность излучения пламени измерялась модулем ФЭУ (Hamamatsu; H7712-02), узкополосным усилителем и узкополосными фильтрами с центрами полосы пропускания 550 и 750 нм (ширина 10 нм на полувысоте профиля). Соотношение интенсивностей излучения при данных длинах волн (550 и 750 нм) носит линейный характер при калибровке вольфрамовой лампой, и поэтому связь между температурой и соотношением интенсивностей излучения для ламинарного диффузионного пламени описывается выражением (рис. 4)

$$\ln R_f = 2.646 - 7.004 \left(\frac{1000}{T} \right),$$

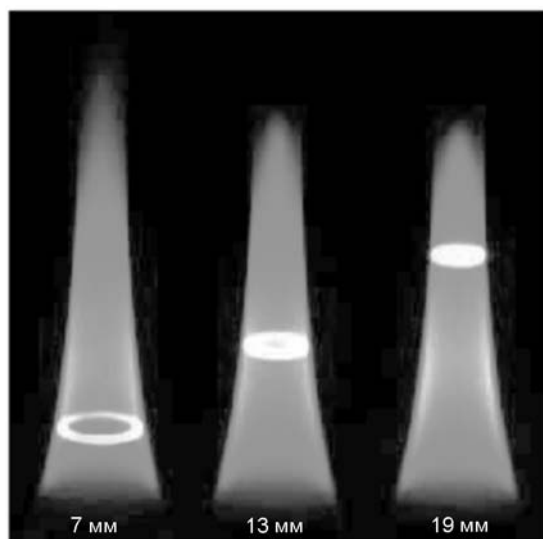


Рис. 5. Рассеяние частицами излучения многомодового лазера, находящегося на различных расстояниях h

где управляющее напряжение ФЭУ на источник питания (Hamamatsu; H7712-02) установлено на уровне 0.4 В, а измеряемые интенсивности излучения приведены в милливольтках. Анализ погрешности показал, что температуры, измеренные методом пирометрии, соответствуют тем, что получены методом коэффициента КЛ, с точностью 1 К; поэтому в данной работе значения температуры частиц сажи измерялись методом пирометрии. Применение трехточечной инверсии Абеля позволяет также получить пространственное распределение температур сажи [11–13].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для исследования влияния радиационного теплообмена на процессы образования и окисления сажи диффузионные пропиленовые пламена нагревались плоским лучом с использованием техники лазерного ножа, лазер находился на различных расстояниях от среза, мощность многоволнового аргонового лазера 2.54 Вт. Фотография полученного пламени приведена на рис. 5. Полная энергия, поглощаемая пламенем, составляла 16, 17 и 8 % полной энергии лазера на расстояниях $h = 7, 13$ и 19 мм соответственно.

Видно, что лазерная энергия поглощается в основном в кольцеобразной области на рас-

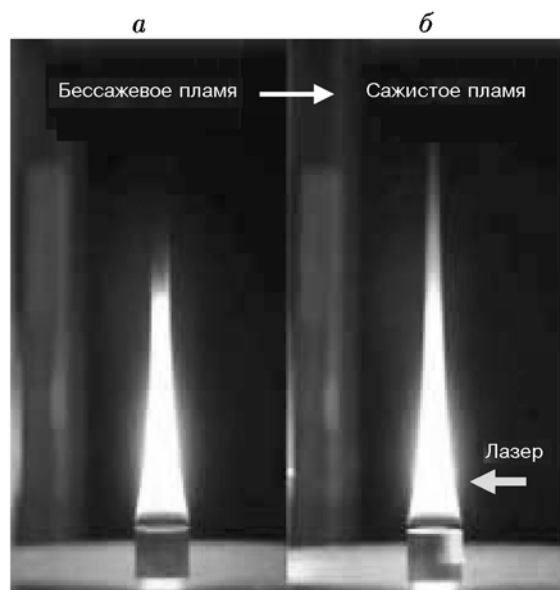


Рис. 6. Фотография пропиленового диффузионного пламени без нагрева (а) и с нагревом (б) лазером на расстоянии $h = 7$ мм (расход топлива $0.68 \text{ нсм}^3/\text{с}$)

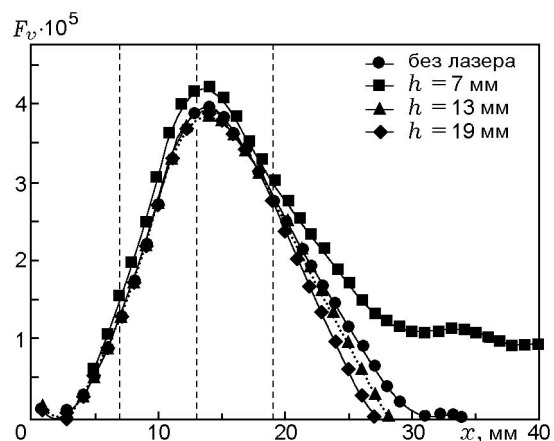


Рис. 7. Объемная доля сажи в зависимости от положения нагреваемого сечения (расход топлива $0.68 \text{ нсм}^3/\text{с}$)

стоянии только 7 мм, в кольцеобразной и иногда внутренней областях при $h = 13$ мм и во всем поперечном сечении пламени при $h = 19$ мм. Эти сечения совпадают с областью, где количество сажи велико, и поэтому считается, что большая часть энергии лазера поглощается частицами сажи.

На рис. 6 показано изменение структуры бессажевого пламени, когда оно облучается на расстоянии $h = 7$ мм. Под воздействием лазерного излучения образование сажи усиливается.

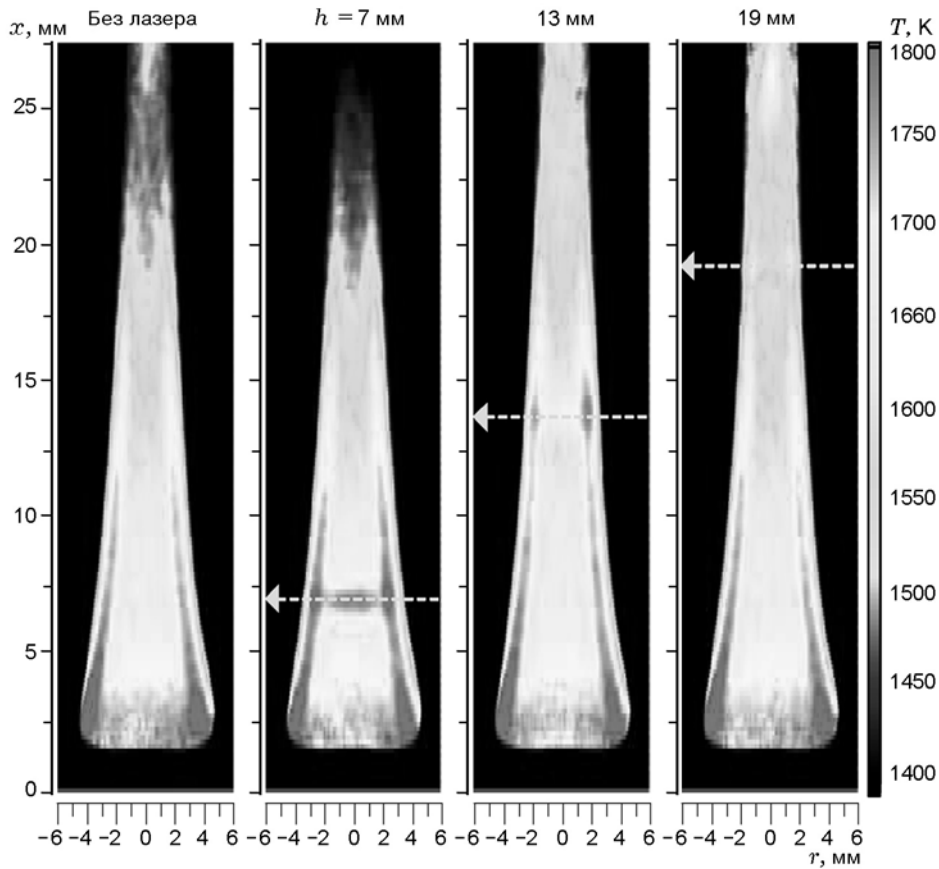


Рис. 8. Двумерное распределение температуры с нагревом лазером и без него (расход топлива $0.68 \text{ нсм}^3/\text{с}$)

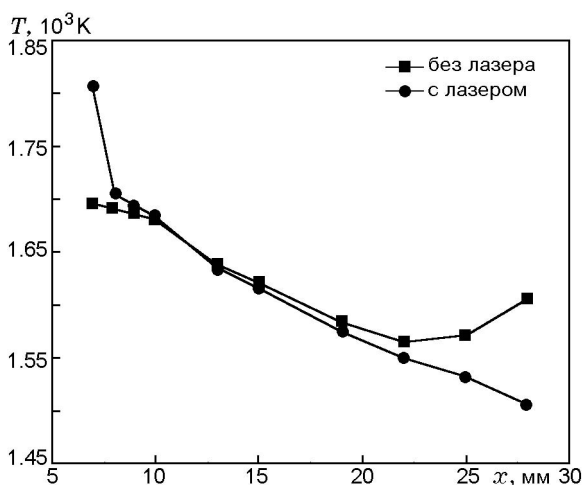


Рис. 9. Распределение температуры сажи вдоль оси пламени при нагреве лазером, находящимся на расстоянии $h = 7 \text{ мм}$

Таким образом, бессажевое пламя (рис. 6, а), нагреваемое плоским пучком лазера на расстоянии $h = 7 \text{ мм}$, преобразуется в сажистое (см. рис. 6, б). При облучении лазером на расстоянии 13 либо 19 мм длина свечения пламени несколько уменьшалась.

На рис. 7 и 8 представлены объемные доли сажи и распределения температуры в пламени в присутствии лазера и без него (координата x на рис. 7–13 обозначает расстояние вдоль оси пламени от среза горелки). В пламени, подогреваемом лазером на расстоянии 7 мм, где преобладает процесс образования сажи, формируется большее количество частиц сажи, чем в случае без лазерного нагрева (см. рис. 7). Поскольку возросшая объемная доля сажи в пламени стимулирует радиационные потери тепла, температура пламени снижается вниз по потоку, особенно в области окисления сажи, как видно из рис. 8. Так что если температура пламени падает ниже точки, в которой происходит про-

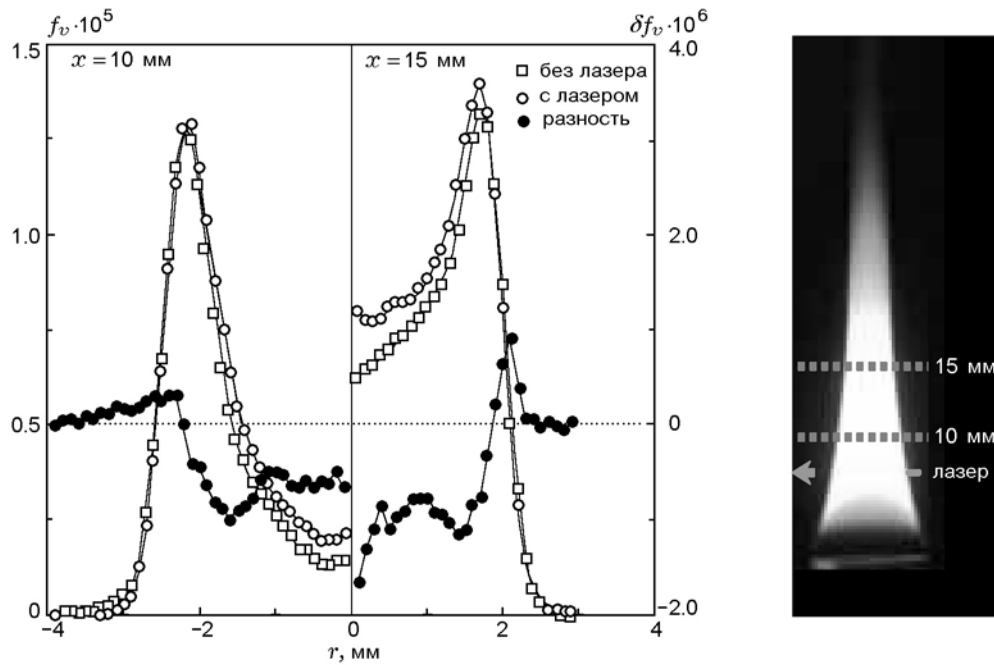


Рис. 10. Радиальное распределение локальной объемной доли сажи и ее изменение (δf_v) под действием лазерного излучения при $h = 7$ мм на различных расстояниях от среза горелки (справа — фотография пламени)

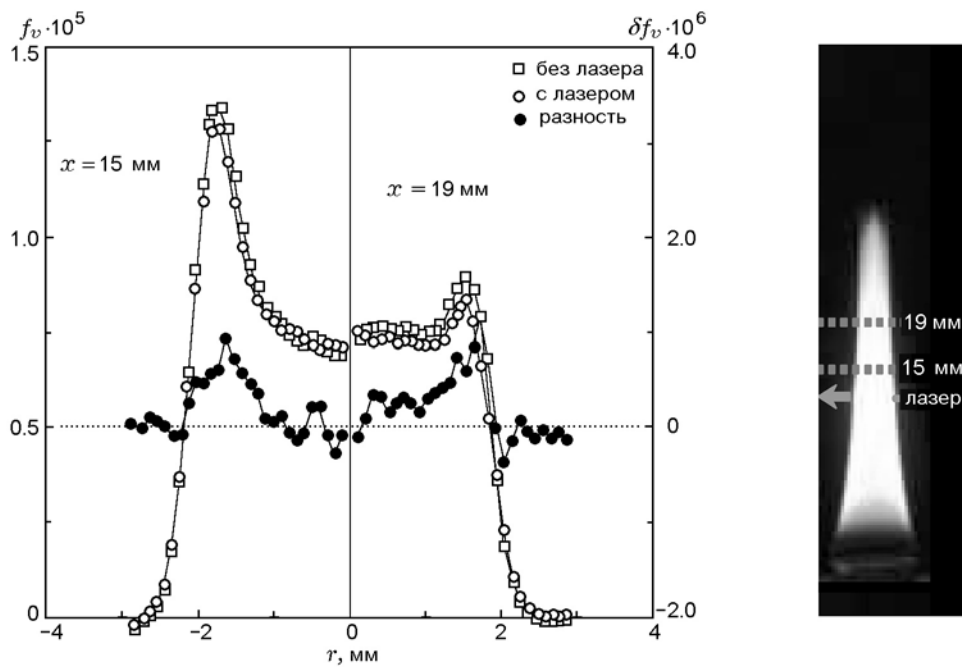


Рис. 11. Радиальное распределение локальной объемной доли сажи и ее изменение под действием лазерного излучения при $h = 13$ мм на различных расстояниях от среза горелки (справа — фотография пламени)

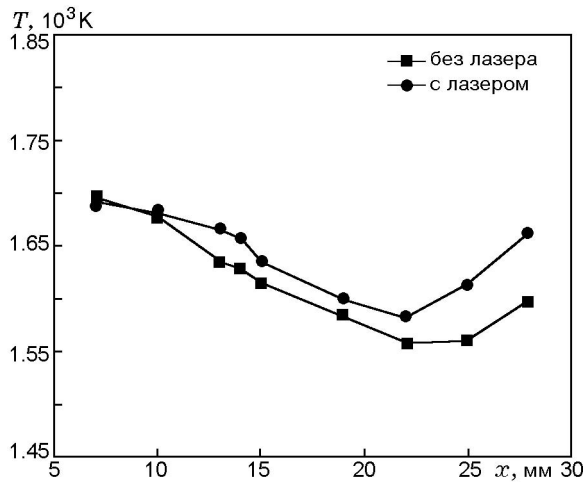


Рис. 12. Распределение температуры сажи вдоль оси при нагреве лазером, находящимся на расстоянии $h = 13$ мм

цесс окисления сажи, из пламени начинают выделяться частицы сажи, как показано на рис. 6 и 7.

Напротив, при лазерном нагреве в сечениях $h = 13$ либо 19 мм, где процесс окисления сажи усиливается или даже становится преобладающим, понижение объемной доли сажи вследствие окисления приводит к менее существенным радиационным тепловым потерям.

В результате при помощи лазерного нагрева можно быстро окислить частицы сажи в пламени при $h = 13$ или 19 мм, как показано на рис. 7.

Изменение температуры сажи вдоль оси (рис. 9) не противоречит приведенным выше объяснениям. Когда пламя нагревается лазером на высоте 7 мм, температура сажи резко возрастает, доходя до уровня температуры в случае без подогрева на высоте $h = 10$ мм, а затем снижается быстрее, чем это происходит выше области $h = 13$ мм, из-за радиационных потерь, возросших вследствие увеличения выхода сажи. Однако в случае отсутствия лазерного нагрева температура снова повышается на расстоянии $x = 22.5$ мм благодаря тепловыделению от процесса окисления сажи.

Описанные выше результаты показывают, что влияние лазерного нагрева различно по высоте пламени. На рис. 10 приведено радиальное распределение локальной объемной доли сажи в сечениях диаметром $D = 10$ и 15 мм, когда лазер установлен на расстоянии $h = 7$ мм. Что касается разности локальных объемных долей

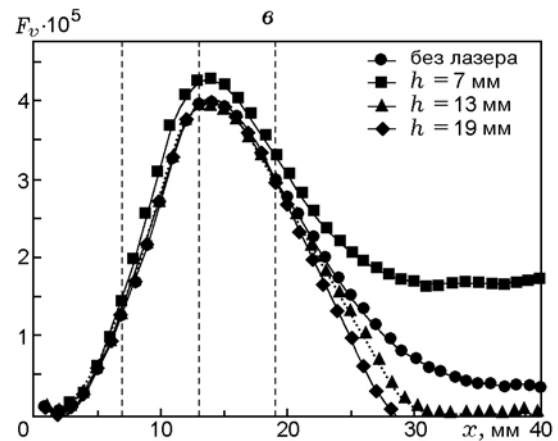
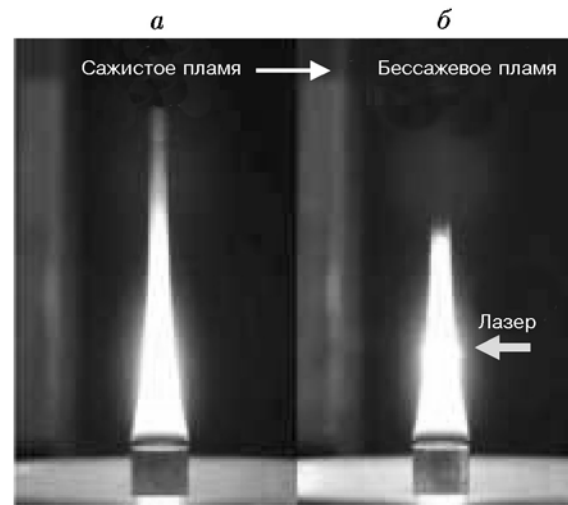


Рис. 13. Фотография пропиленового диффузионного пламени без воздействия лазерного излучения (а) и при воздействии лазером на расстоянии $h = 13$ мм (б). Объемная доля сажи в зависимости от высоты сечения нагрева (в) (расход топлива $0.71 \text{ нсм}^3/\text{с}$)

сажи в случае с лазером и без него, знак плюс соответствует окислению, минус — образованию сажи. В случае лазерного облучения на высоте 7 мм некоторая часть сажи окисляется в кольцеобразной зоне, но во внутренней части пламени наблюдается резкое усиление сажеобразования. Другими словами, повышение температуры за счет радиационного теплопереноса от нагретых частиц и газа в области сажеобразования мощно стимулирует процесс образования сажи, что в конечном итоге приводит к изменениям структуры пламени.

На рис. 11 представлено радиальное распределение локальной объемной доли сажи в сечениях пламени на высоте 15 и 19 мм, ко-

гда плоскость нагрева установлена на высоте 13 мм. В этом случае окисление сажи в кольцеобразной области сажи усиливается благодаря росту температуры за счет поглощения энергии лазера, но имеется небольшое изменение во внутренней части пламени.

Из рис. 12 следует, что температура на участке конкурирующих процессов образования и окисления сажи растет вследствие окисления сажи и пониженных радиационных потерь, вызванных лазерным нагревом.

На рис. 13 показан переход сажистого пламени в бессажевое под воздействием лазерного нагрева в сечении $h = 13$ мм. В этой области лазерный нагрев стимулирует прежде всего скорость окисления сажи, а не скорость ее образования. Однако в случае нагрева участка сажеобразования при $h = 7$ мм процесс сажеобразования усиливается, в то время как в случае $h = 19$ мм, напротив, усиливается процесс окисления (пламя укорачивается).

ВЫВОДЫ

Для изучения влияния излучения сажи проведено экспериментальное исследование изменения структуры спутных пропиленовых диффузионных пламен под воздействием облучения лазером. Бессажевое пламя может переходить в сажистое при лазерном нагреве области сажеобразования, а сажистое пламя, в свою очередь, может переходить в пламя без сажи, если лазером нагревается область образования либо окисления сажи.

Радиационные потери в области сажеобразования снижают скорость образования сажи, что ведет к усилению окисления и способствует появлению пламени без сажи. Радиационные потери в области образования/окисления сажи снижают скорость окисления сажи, подавляя процесс окисления, что способствует появлению сажистого пламени. Структура пламени и температурные поля зависят от локальных радиационных потерь сажи. Проведенные эксперименты с лазерным нагревом помогают понять влияние радиационного теплопереноса на процессы образования и окисления сажи в диффузионных пламенах и могут быть использованы для построения эффективной модели сажеобразования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Delichatsios M. A., Ris J. D., Orloff L.** An enhanced flame radiation burner // *Proc. Combust. Inst.* 1992. V. 24. P. 1075–1082.
2. **Kennedy I. M.** Models of soot formation and oxidation // *Progr. in Energy and Combust. Sci.* 1997. V. 23. P. 95–132.
3. **Kennedy I. M., Yam C., Rapp D. C., Santoro R. J.** Modeling and measurements of soot and species in a laminar diffusion flame // *Combust. Flame.* 1996. V. 107. P. 368–382.
4. **Krestinin A. V.** Detailed modeling of soot formation in hydrocarbon pyrolysis // *Combust. Flame.* 2000. V. 121. P. 513–524.
5. **D'Alessio A., D'Anna A., D'Orsi A., et al.** // *Proc. Combust. Inst.* 1992. V. 24. P. 973.
6. **Dobbins R. A.** Soot inception temperature and carbonization rate of precursor particles // *Combust. Flame.* 2002. V. 130. P. 204–214.
7. **Oh K. C., Lee U. D., Lee E. J., Shin H. D.** The evolution of incipient soot particles in ethane inverse diffusion flame // *Combust. Flame.* 2005. V. 140. P. 249–254.
8. **Smooke M. D., Mcenally C. S., Pfefferle L. D.** Computational and experimental study of soot formation in a coflow laminar diffusion flame // *Combust. Flame.* 1999. V. 117. P. 117–139.
9. **Mcenally C. S., Schaffer A. M., Long M. B., et al.** Computational and experimental study of soot formation in a coflow laminar ethylene diffusion flame // *Proc. Combust. Inst.* 1998. V. 27. P. 1497–1505.
10. **Liu F., Guo H., Smallwood G. J., Gulder O. L.** Effects of gas and soot radiation on soot formation in a coflow laminar ethylene diffusion flame // *J. Quant. Spectroscopy and Radiative Heat Transfer.* 2002. V. 73. P. 409–421.
11. **Lee W.** The effect of pressure on pah and soot formation at elevated pressure // *J. of KSME (B) (in Korean).* 1998. V. 22, N 10. P. 1445–1453.
12. **Lee W., Na Y. D.** Soot study in laminar diffusion flames at elevated pressure using two-color pyrometry and abel inversion // *4th JSME-KSME Thermal Engineering Conf., Kobe, Japan,* 2000.
13. **Dasch C. J.** One-dimensional tomography: a comparison of Abel, onion-peeling, and filtered back projection methods // *Appl. Optics.* 1992. V. 31. P. 1146–1152.

Поступила в редакцию 26/II 2006 г.