

УДК 536.46

**ПРОЦЕССЫ САЖЕОБРАЗОВАНИЯ  
В ПЛАМЕНАХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ  
НА ОСНОВЕ ПЕРХЛОРАТА АММОНИЯ И ПОЛИБУТАДИЕНОвого КАУЧУКА**

**SOOTING PROCESSES IN FLAMES OF CONDENSED SYSTEMS ON THE BASIS  
OF AMMONIUM PERCHLORATE AND POLYBUTADIENE RUBBER**

**О. В. Васильева, С. И. Ксенофонов, Р. Р. Санатулло**

**O. V. Vasilyeva, S. I. Ksenofontov, R. R. Sanatullo**

*ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный педагогический  
университет им. И. Я. Яковлева», г. Чебоксары*

**Аннотация.** Предложен новый метод диагностики процесса сажеобразования, основанный на обработке изображения пламени оптическими методами с применением современных компьютерных технологий. Показано, что в диффузионных пламенах жидких углеводородов сажеобразование происходит как на тонкой поверхности светящегося пламени, так и в объеме – вершине светящегося конуса.

Установлено, что наличие окислителя в составе топлива смещает объемные процессы сажеобразования в сторону поверхностных процессов, разграниченных контурами горячее – окислитель.

**Abstract.** The new diagnostic technique for sooting processes is suggested. This technique is based on processing the image of flame by means of optical methods and modern information technologies. It is shown that sooting in diffusion flames of liquid hydrocarbons takes place both on a thin surface of the flame and in the volume which is the top of a luminous cone.

It is established that the occurrence of oxidizing agent in the composition of the fuel shifts the volume processes of sooting to the surface.

**Ключевые слова:** *частица, сажа, сажеобразование, конденсированные системы, перхлорат аммония, полибутадиеновый каучук.*

**Keywords:** *particle, soot, sooting, condensed systems, ammonium perchlorate, polybutadiene rubber.*

**Актуальность исследуемой проблемы.** При горении углеводородных топлив неотъемлемым процессом является образование сажи в диффузионном пламени. В некоторых случаях сажа – необходимый продукт, и в ходе горения необходимо инициировать ее получение [9]. В топочных камерах и двигателях внутреннего сгорания образование сажи показывает плохую организацию режима горения [2], [3]. Поэтому диагностика образования сажи и его регулирование являются актуальной задачей горения.

Целью настоящей работы является выявление особенностей формирования углерода в пламенах конденсированных систем.

**Материал и методика исследований.** Задача выявления механизма образования сажи уже ставилась [1]. На сегодняшний день предложенные механизмы продолжают обсуждаться, предлагаются новые экспериментальные данные, но они не могут быть объяснены теоретическими подходами к образованию сажи. Столь сложный физико-химический процесс образования сажи объясняется многостадийностью процесса превращения горючего в конечные продукты.

Некоторые исследователи объясняют полученные результаты развалом молекул углеводорода на более простые молекулы. Остаток молекулы при этом обогащается углеродом, и в конце концов остается молекула, состоящая из одного углерода. Молекулы «сливаются», и образуется поверхность – макроскопическая частица. Размеры таких образований ~ 5÷50 нм. В некоторых случаях крупные частицы агломерируются и образуются нити, состоящие из многих объединенных шариков.

Согласно другой теории, крупная частица сажи образуется путем пиролиза крупной углеводородной частицы. Например, в дизелях капли топлива подвергаются «термической обработке», в результате которой остается углистый остаток. Этот остаток подвергается дальнейшим превращениям: часть углерода или других атомов выгорает, а остаток выбрасывается продуктами сгорания в атмосферу. В обоих случаях полученные частицы подвергаются микроскопическому исследованию с целью установления дисперсного состава образований.

В работе предложен новый подход к изучению образования сажи в пламени, заключающийся в фотографировании пламени и последующем анализе фотографий с помощью авторских программных средств.

В качестве объектов исследования использовались модельные топлива с отрицательным кислородным балансом на основе полибутадиенового каучука и перхлората аммония. Механическая смесь определенного состава подвергалась полимеризации. Образцы представляли собой цилиндр диаметром 9 мм и высотой 10–15 мм. Сжигание образцов производилось при комнатных условиях.

Для сравнения использовалось пламя осветительного керосина КО-20. Горелка внутренним диаметром 13 мм снабжалась хлопчатобумажным фитилем. Пламя и продукты горения представляли собой осесимметричный поток, удобный для исследований [5], [6].

Программные средства позволяют рассматривать изображение пламени в виде отдельных элементов – пикселей. Каждый пиксель, кроме геометрических размеров, оценивается уровнем яркости. В черно-белом варианте принято разделять 256 уровней градации яркости. Таким образом, введенное изображение разбивается на отдельные элементы и каждый элемент оценивается по уровню яркости. Такая оцифровка изображения проводится с помощью программы «Flame Brightness», и полученный массив сохраняется в виде отдельного файла. Массив позволяет получить распределение яркости в горизонтальном или вертикальном направлении.

Изображение пламени представляет собой светлые пиксели на темном фоне. Для выделения границ пламени вводится электронный фильтр, называемый окном-обработчиком изображения. Окно выбирается размером 3x1 пикселя. В ходе обработки окно пробегает вдоль строки слева направо. Усредненное значение трех пикселей приписывается к новому значению среднего пикселя окна. Далее окно передвигается по строке вправо на один пиксель, и процедура усреднения повторяется. Таким образом, изображение строки оцифровывается по-новому. Такая обработка проводится по всем строкам изображения. Полученный массив значений яркости пикселей можно представить в виде

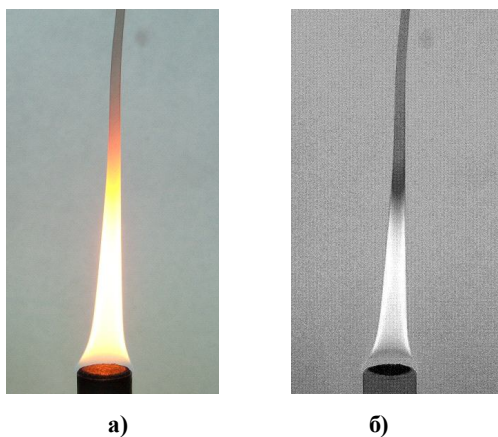
распределений яркости изображений вдоль горизонтальной оси или же вдоль вертикальной оси. Данный метод оцифровки изображения позволяет повысить контраст изображения и выделить границу перехода от темной к яркой области рисунка.

Как показывает опыт, любое изображение представляет собой последовательный набор разных по уровню яркости пикселей. Это явление происходит и при записи изображения в цифровом фотоаппарате из-за квантования оптического сигнала в пределах площади пикселя регистрирующей ПЗС-матрицы. По этим причинам график распределения яркости даже равномерного фона получается с резкими скачками. Только путем усреднения в пределах окна-обработчика можно получить более плавный график распределения яркости фона.

В ходе определения границ пламени окно-обработчик пробегает по строке изображения, встречаясь на пути с изменяющимися по яркости пикселями. Если в пределах пяти последующих пикселей изменение яркости больше нуля  $|dL/dx| > 0$ , то первый пиксель – это координата границы пламени.

Таким образом, по распределению яркости пламени вдоль горизонтальной плоскости и по высоте можно определять границы пламени, выявлять зоны максимальной яркости, где происходят активные химические реакции.

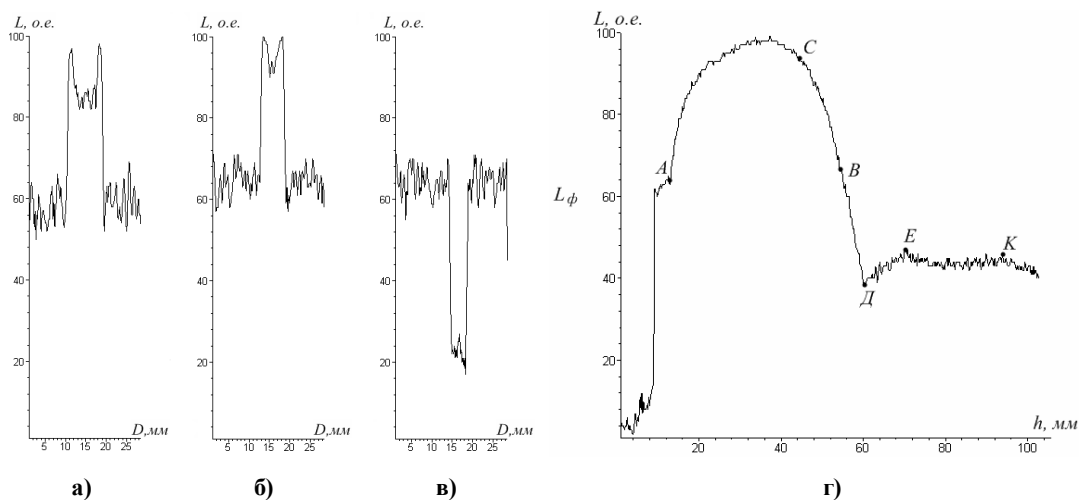
**Результаты исследований и их обсуждение.** На рис. 1 представлены фотографии пламени керосина марки КО-20, полученные в ходе прямой съемки (рис. 1 а) и обработанные с помощью электронных фильтров (рис. 1 б). Данный метод обработки позволяет выявлять особенности яркостной структуры диффузионного пламени.



**Рис. 1. Фотографии пламени керосина КО-20:**  
*а) прямая съемка, б) отфильтрованное изображение*

Графики распределения яркости изображения пламени в горизонтальном направлении  $L(x)$  представлены на рис. 2 а, б, в. Яркость изображения отложена вдоль оси ординат в относительных единицах (о. е.). На уровне яркости  $L_{\phi}=60$  о. е. регистрируется излучение фона. У основания факела распределение яркости в периферийной зоне имеет максимальное значение, а в центральной – намного меньшее. Анализ полученного распределения методами одноактурной томографии [8] позволяет оценить толщину зоны свечения пламени. Расчеты показывают, что толщина зоны свечения на высоте 10 мм над горелкой составляет 0,14 мм. Такую толщину пламени можно считать поверхностью.

С увеличением высоты толщина пламени возрастает, и на некоторой высоте яркость фона и яркость зоны пламени выравниваются. С дальнейшим увеличением высоты в центре потока наблюдается поглощение света частицами сажи. Характер распределения поглощения света при  $L < L_{\phi}$  позволяет говорить о том, что концентрация сажистых частиц в потоке почти одинаковая (рис. 2 в).



**Рис. 2. Распределение яркости пламени:**  
 а, б, в – по диаметру  $L(D)$ , высота сканирования над горелкой: а)  $h = 10$  мм,  
 б)  $h = 20$  мм, в)  $h = 43$  мм; г) по высоте  $L(h)$

Анализ распределения яркости по высоте пламени позволяет сделать ряд выводов (рис. 2 г). На участке СД яркость пламени уменьшается с постоянным градиентом  $dL/dh$ . Выделенный объем в пламени подвергается тепловому воздействию с внешней стороны. Внутри выделенного объема возможно образование сажи по всему объему. На участке ДЕ наблюдается осветление пламени, что связано с процессом агломерации частиц сажи. На участке ЕК яркость продуктов горения не меняется, что говорит о завершении процессов агломерации [4], [7].

Таким образом, методы фотометрирования изображения позволяют определять границы области сажеобразования и режим ее образования в диффузионном пламени.

Процесс сажеобразования в пламени изучался и спектральными методами. Участки пламени проектировались на входную щель спектрометра. Полученные участки спектра в ультрафиолетовом и видимом диапазонах представлены на рис. 3 а, б. У основания пламени спектр пламени – отдельные линии с острыми максимумами, среди которых можно выделить линии натрия ( $\lambda=589$  нм) и углерода С. Натрий выявляется как технологическая примесь. Присутствие постоянного фона говорит о наличии твердых частиц сажи. На самом деле в свечении пламени присутствует только голубое свечение.

С увеличением высоты сканирования спектр пламени обогащается излучением конденсированных частиц, а излучение отдельных линий на этом фоне почти исчезает (рис. 3 б).

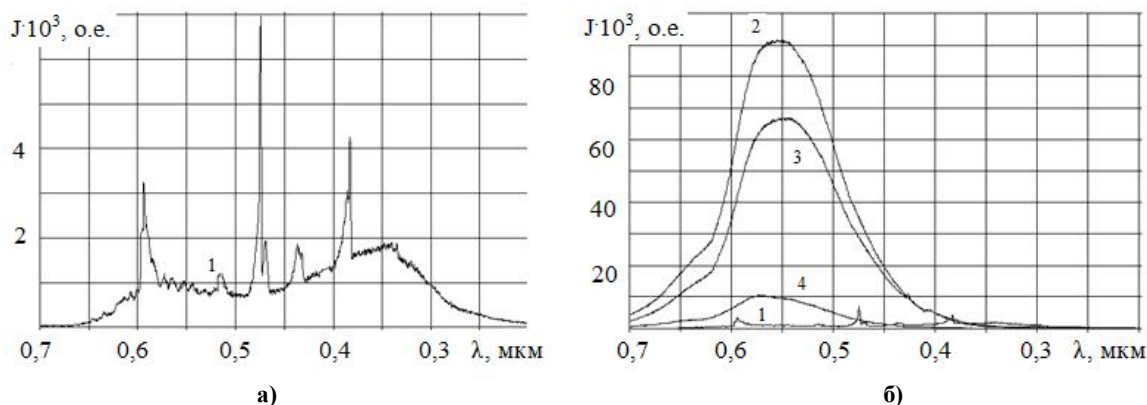


Рис. 3. Спектральная характеристика пламени керосина КО-20, кривые: 1)  $h = 0$  мм, 2)  $h = 9$  мм, 3)  $h = 22$  мм, 4)  $h = 32$  мм

Спектры, приведенные на рис. 3 б, подтверждают процессы интенсивного сажеобразования в пламени с увеличением высоты. Когда температура продуктов горения уменьшается и свечение частиц становится едва заметным, максимальное значение интенсивности спектра уменьшается (кривая 4).

При горении модельных топлив с отрицательным кислородным балансом образуется большое количество сажистых частиц (рис. 4 а). Пиролиз полибутадиенового каучука поставляет в продукты сгорания углеводородные молекулы, пересыщенные углеродом. Часть углерода сгорает в воздухе, образуя фронт пламени ярко-оранжевого цвета. Пламя ячеистое, состоящее из отдельных язычков.

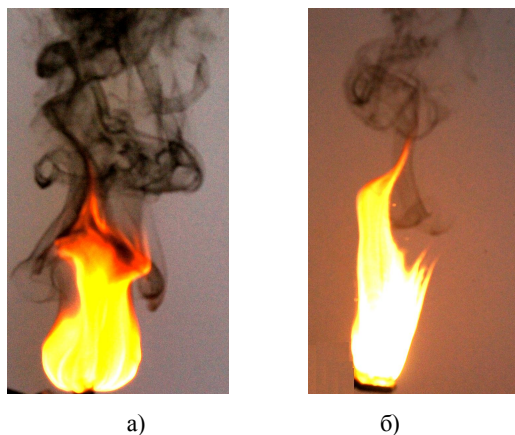
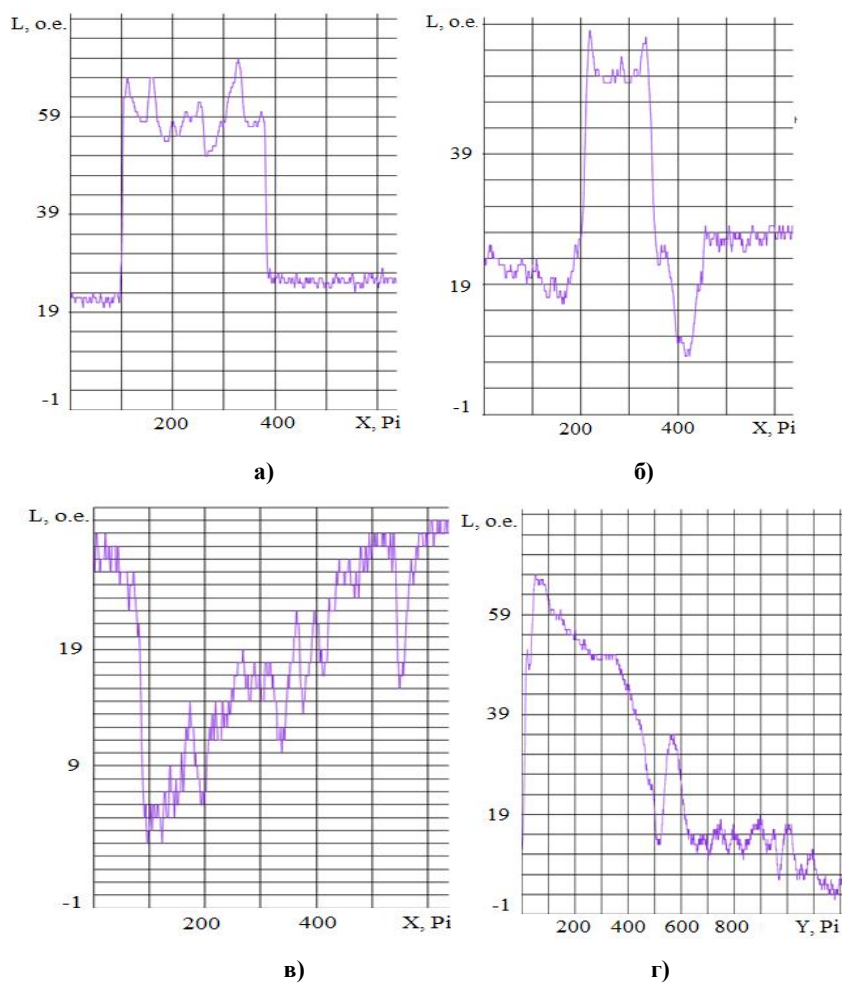


Рис. 4. Фотографии полибутадиенового каучука: а) 5 % окислителя, б) 30 % окислителя

Внутри язычка пламени происходит явление пиролиза углеводородного топлива, на конце язычка образуется сажевый шлейф. Характер распределения яркости (рис. 5 а, б, в) вдоль горизонтальной плоскости  $L(x)$  на разных высотах и поперечные размеры язычков пламени подтверждают данное предположение. На вершине факела излучение пламени почти отсутствует, поэтому яркость потоков продуктов меньше яр-

кости фона  $L < L_{\phi}$ . Границы потоков резко ограничены, потоки между собой не перемешиваются. Внутри потоков концентрация частиц сажи высокая, что отражается на значениях яркости.

Изменение яркости пламени на высоте  $L(h)$  позволяет выделить несколько зон в пламени. В первой зоне, охватывающей основание факела ( $h \leq 60$  мм), яркость пламени уменьшается с градиентом 0,45 о. е. яркости/мм. Во второй зоне ( $60 \text{ мм} < h < 80$  мм) изменения яркости по высоте происходят с градиентом 1,48 о. е. яркости/мм. Начиная с высоты  $h \geq 80$  мм и выше свечение пламени ниже уровня фона изображения и заметные изменения яркости по высоте отсутствуют. Процесс сажеобразования в целом завершен.



**Рис. 5. Распределение яркости пламени: а, б, в – по диаметру  $L(x)$ ; высота сканирования над поверхностью горения: а)  $h = 15$  мм, б)  $h = 45$  мм, в)  $h = 150$  мм; г) по высоте  $L(h)$**

Для топлив, где концентрация окислителя высока, горение углеводорода происходит за счет окислителя, заложенного в топливо. Воздух как окислитель действует с внешней оболочки пламени.

Структура пламени (рис. 4 б) более однородна, яркость пламени вдоль горизонта почти постоянная и по уровню яркости превышает первый образец (рис. 6 а). Только на значительных высотах можно выявить расчленение пламени на отдельные язычки (рис. 6 б). Количество образовавшейся сажи значительно меньше (рис. 6 в).

Изменение яркости по высоте пламени характеризуется другими градиентами яркости. На высотах  $30 \text{ мм} < h < 60 \text{ мм}$  градиент изменения яркости составляет  $0,66 \text{ о. е. яркости/мм}$ , на высотах  $60 \text{ мм} < h < 110 \text{ мм}$  –  $1,0 \text{ о. е. яркости/мм}$ . Начиная с некоторой высоты  $h \geq 110 \text{ мм}$  изменения яркости (рис. 6 г) почти отсутствуют. Здесь процессы сажеобразования почти завершены. Таким образом, значение градиента яркости по высоте показывает интенсивность образования сажи в пламени.

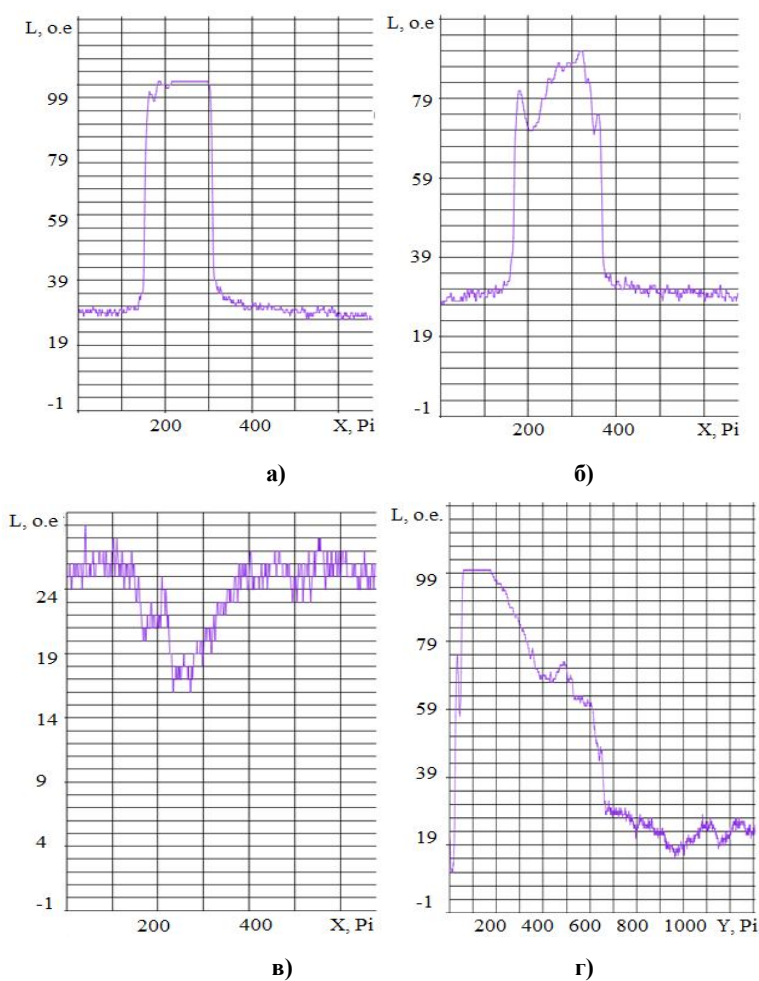


Рис. 6. Распределение яркости пламени: а, б, в – по диаметру  $L(x)$ ; высота сканирования над поверхностью горения: а)  $h = 15 \text{ мм}$ , б)  $h = 45 \text{ мм}$ , в)  $h = 150 \text{ мм}$ ; г) по высоте  $L(h)$

**Резюме.** При горении составов на основе перхлората аммония и полибутадиенового каучука образование сажи происходит как поверхностным, так и объемным механизмами. Аналогичные механизмы сажеобразования имеют место и в диффузионном пламени керосина КО-20. При увеличении количества окислителя, особенно крупнозернистого, наблюдается смещение к поверхностному механизму образования сажи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Блох, А. Г. Основы теплообмена излучением / А. Г. Блох. – М. : Госэнергоиздат, 1962. – 326 с.
2. Блох, А. Г. Тепловое излучение в котельных установках / А. Г. Блох. – Л. : Энергия, 1967. – 325 с.
3. Блох, А. Г. Теплообмен в топках паровых котлов / А. Г. Блох. – М. : Госэнергоиздат, 1984. – 240 с.
4. Ксенофонтов, С. И. Оптическая плотность продуктов сгорания углеводородных топлив / С. И. Ксенофонтов, О. В. Васильева, А. М. Порфирьев // Сб. мат. XIX Всерос. межвуз. науч.-тех. конф. «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий». Ч. 2. – Казань, 2010. – С. 72–74.
5. Ксенофонтов, С. И. Оптические свойства пламени жидких углеводородов / С. И. Ксенофонтов, О. В. Васильева // Сб. мат. XIX Всерос. межвуз. науч.-тех. конф. «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий». Ч. 2. – Казань, 2009. – С. 48–50.
6. Ксенофонтов, С. И. Процессы агломерации частиц сажи в диффузионных факелах жидких углеводородов / С. И. Ксенофонтов, О. В. Васильева // Сб. мат. XIX Всерос. межвуз. науч.-тех. конф. «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий». Ч. 2. – Казань, 2007. – С. 137–139.
7. Ксенофонтов, С. И. Распределение частиц сажи в диффузионном пламени жидких углеводородных топлив / С. И. Ксенофонтов, О. В. Васильева, А. М. Порфирьев // Сб. мат. XIX Всерос. межвуз. науч.-тех. конф. «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий». Ч. 2. – Казань, 2010. – С. 64–65.
8. Пикалов, В. В. Томография плазмы / В. В. Пикалов, Т. С. Мельникова. – Новосибирск : Наука ; Сибирская издательская фирма РАН, 1995. – 229 с.
9. Теснер, П. А. Образование углерода из углеводородов газовой фазы / П. А. Теснер. – М. : Химия, 1972. – 136 с.