

УДК 532.5:536.461:537.5

© 2005 г. А. Б. ВАТАЖИН, Д. А. ГОЛЕНЦОВ, В. А. ЛИХТЕР

ЭКСТРАКЦИЯ САЖИ ИЗ ЛАМИНАРНОГО УГЛЕВОДОРОДНОГО ПЛАМЕНИ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Проведено экспериментальное исследование осаждения сажи из вертикального ламинарного углеводородного пламени на стержень, установленный вне пламени и находящийся под одним потенциалом с горельным устройством, при подаче на последний отрицательного потенциала. Определены вольт-амперные характеристики системы горелка – стержень – верхний сеточный электрод и токи, текущие на каждый из перечисленных элементов, при подаче на горелку как отрицательного, так и положительного потенциалов. Изучена картина роста отложения сажи на стержне при увеличении отрицательного потенциала. Обнаружен принципиальный эффект: при положительном потенциале горелки экстракция сажи не происходит. Дано качественное объяснение полученных экспериментальных результатов.

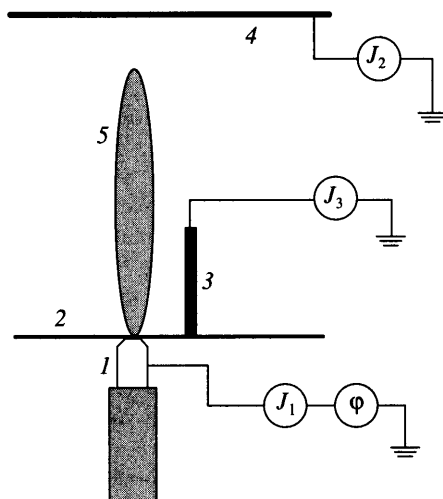
Ключевые слова: ламинарное углеводородное пламя, электрическое поле, осаждение сажи.

В последнее время в связи с возникающими экологическими проблемами большое внимание уделяется исследованию электрофизических свойств частиц сажи в продуктах сгорания углеводородного топлива. При этом становится актуальным анализ способов экстракции частиц сажи из пламени. Одна из возможностей такой экстракции – использование электрического поля.

Экспериментальное и теоретическое исследование влияния электрического поля на сажеобразование в углеводородных ламинарных пламенах проводится в течение длительного времени (см., например, [1–6]). Были изучены особенности воздействия электрического поля на геометрию пламени [1–4] и на эмиссию окислов азота [5]. В работе [5] было сообщено о возможности использования постоянного электрического поля для извлечения сажи из ламинарного пропанового факела. Однако подробное исследование этого вопроса проведено не было. В данной статье приведены результаты такого экспериментального исследования, и дан их качественный анализ.

1. Экспериментальная установка. Экспериментальные исследования проводились на модельной установке (фиг. 1), на которой создавалось ламинарное диффузионное пламя при горении пропана в воздухе. В горелку 1 диаметром 5 мм была вставлена трубка подачи пропана диаметром 0.5 мм. Числа Рейнольдса и Фруда в экспериментах составляли 120 и 500 соответственно.

В плоскости среза горелки устанавливался сеточный электрод 2 диаметром 110 мм. Горелка 1 и электрод 2 представляли собой единый металлический проводник (систему 1–2), на который подавался отрицательный или положительный потенциал, изменяющийся от 0 до 9 кВ. К нижней сетке 2 крепился вертикальный стальной стержень 3 диаметром 1.1 мм и высотой 15 мм; варьировалось расстояние от вертикальной оси горелки до стержня. Большинство экспериментов проводилось при фиксированном расстоянии от стержня до оси горелки, которое составляло 10 мм. Вторым электродом была приемная сетка 4 диаметром 110 мм, находящаяся, как правило, под потенциалом земли ($\varphi = 0$) и устанавливаемая выше сетки 2 на расстоянии 80 мм. В большинстве случаев элементы 1, 2 и стержень 3 также составляли единую электрическую систему 1–2–3. Однако была предусмотрена возможность изоляции стержня 4 от



Фиг. 1. Схема установки: 1 – горелка, 2 – нижний сетчатый электрод, 3 – стержень, 4 – верхний сетчатый электрод, 5 – пламя

сетки 2 для измерения электрического тока, текущего непосредственно на стержень 3. В экспериментах измерялись токи J_1 , J_2 и J_3 , соответственно стекающие по электрическим цепям с системы 1–2, сетки 4, и стержня 3 (при его изоляции от системы 1–2). Эти токи равны токам, текущим из пламени на указанные элементы.

Для правильного определения тока, стекающего с систем 1–2, 1–2–3, стержня 3 и верхней сетки 4, были найдены токи утечки с указанных элементов. Для этого были проведены эксперименты при отсутствии пламени и различном напряжении Φ , подаваемом на эти элементы.

2. Предварительные эксперименты. Прежде всего были повторены ранее выполненные в [5] эксперименты по влиянию на геометрию пламени вертикального электрического поля при отсутствии стержня. При подаче на горелку отрицательного потенциала высота пламени уменьшается и его ширина возрастает (пламя, уширяясь, “приседает”). В случае положительного потенциала горелки пламя незначительно вытягивается вверх, но его деформация в целом невелика. Объяснение такого различного поведения пламени при изменении направления электрического поля, в соответствии с [5], состоит в следующем.

Заряженные компоненты (электроны и положительные ионы) возникают во фронте горения вследствие хемоионизационных реакций. В первом приближении можно считать, что источники этих компонент в областях вне фронта горения вследствие меньшей в них температуры газа отсутствуют. Фронт горения в целом является электрически квазинейтральным. Если электрическое поле отсутствует, то заряженные компоненты движутся вместе с потоком продуктов сгорания. В этом потоке происходят электрохимические реакции (прилипание электронов к нейтральным молекулам, рекомбинация электронов и ионов), но он остается квазинейтральным.

Ситуация принципиально изменяется при включении электрического поля. Пусть горелка заряжена отрицательно. В этом случае положительные ионы из зоны (фронта) горения начинают двигаться в сторону горелки, и вблизи нее образуется нескомпенсированный положительный электрический заряд. Это происходит вследствие того, что дрейфовая скорость ионов, направленная к горелке, оказывается больше противоположно направленной скорости газа. Действительно, при электрическом поле $E = 1.5$ кВ/см и подвижности ионов $b_i = 2$ см²/В · с их дрейфовая скорость равна $b_i E = 30$ м/с,

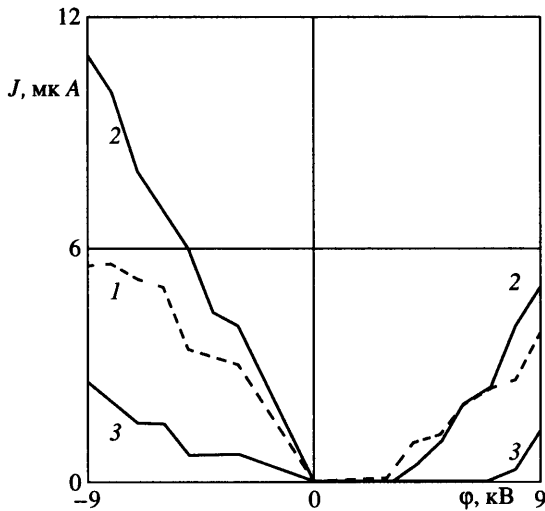
что больше скорости газа, которая в зоне пламени составляет 1–5 м/с. Наличие объемного электрического заряда и электрического поля вызывает появление электрогазодинамической (ЭГД) силы en_iE , где n_i – концентрация положительных ионов, e – элементарный заряд. Оценим величину соответствующего параметра ЭГД взаимодействия $S = en_iEl/\rho u^2$, где l – характерный размер, ρ и u – плотность и скорость газа. При $E = 1.5$ кВ/см, $u = 2.5$ м/с, $\rho = 10^{-4}$ г/см³, $n_i = 5 \cdot 10^9$ см⁻³, $l = 1$ см находим $S = 2$. Следовательно, электрическая сила может существенно изменить движение газа в пламени. Направленная к системе 1–2, она и вызывает указанную выше деформацию пламени.

Когда же на горелку подается положительный потенциал, то вблизи сетки 2 возникает нескомпенсированный отрицательный заряд движущихся к ней электронов. Ток же между пламенем и верхней сеткой переносится положительными ионами. Существенно, что объемная плотность заряда электронов вблизи системы 1–2 мала в связи со следующим обстоятельством. Как указывалось выше, в условиях экспериментов скорости ионов, а тем более электронов, определяются их дрейфовыми скоростями. Из равенства электронного тока в пламени и ионного тока выше него следует, что $b_e E^- n_e \sim b_i E^+ n_i^+$, где b_e – подвижность электронов, n_e и E^- – концентрация электронов и электрическое поле в нижней части пламени, n_i^+ и E^+ – концентрация ионов и электрическое поле выше пламени. Так как $E^- \sim E^+$, то находим, что $n_e/n_i^+ = b_i/b_e \ll 1$ вследствие очень большой электрической подвижности электронов. Кроме того, величины n_i^+ и E^+ имеют такой же порядок величины, как n_i и E в рассмотренном выше случае отрицательной горелки, из-за одинакового порядка величины электрических потенциалов и полных токов, поэтому ЭГД сила, действующая на газ вблизи положительной горелки, равна $en_e E^- = en_i^+ E^-(n_e/n_i^+) \ll en_i E$, где последний член представляет собой ЭГД силу, действующую на газ вблизи отрицательной горелки. В результате деформация пламени вблизи горелки при ее положительном потенциале незначительна. В верхней же части пламени имеется нескомпенсированный положительный заряд ионов, движущихся к верхнему сеточному электроду, и ЭГД сила вытягивает пламя в верхнем направлении.

Вторая серия предварительных экспериментов была проведена при наличии электрического поля и использовании стержня из непроводящего материала (высокотемпературная керамика), имеющего те же размеры и расположенного в том же месте, что металлический стержень. Введение такого стержня не влияло на форму пламени, которая была такой же, как в первой серии предварительных экспериментов. Таким образом, наличие вблизи пламени проводящего объекта (стержня) есть необходимое условие для дополнительного изменения формы пламени при уже наложенном на него электрическом поле.

3. Вольт-амперные характеристики. Зависимости токов J_1, J_2, J_3 от потенциала горелки показаны на фиг. 2. Три основные особенности представленных зависимостей состоят в следующем: уровень всех трех токов при отрицательном потенциале горелки ($\phi < 0$) заметно больше, чем при ее положительном потенциале ($\phi > 0$); ток J_3 на стержень при $\phi > 0$ для большей части диапазона изменения потенциала равен нулю; приближенно выполняется условие, что ток J_2 на верхний электрод 4 равен сумме тока J_1 на систему 1–2 и тока J_3 на стержень (это соотношение нарушается лишь для небольшого диапазона изменения ϕ при положительном потенциале горелки).

Различие вольт-амперных характеристик при подаче на горелку отрицательного и положительного потенциала обусловлено различным поведением пламени в этих ситуациях. Как указывалось в разд. 2, при $\phi < 0$ в нижней части пламени сосредотачивается нескомпенсированный положительный заряд ионов, в результате чего на газ



Фиг. 2. Зависимость токов на элементы установки от потенциала горелки: 1 – ток J_1 на горелку и нижний сеточный электрод, 2 – ток J_2 на верхний сеточный электрод, 3 – ток J_3 на стержень

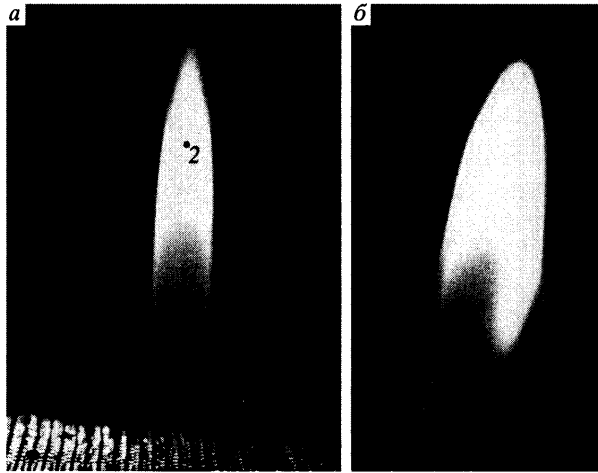
действует ЭГД сила $\mathbf{f} = en_i\mathbf{E}$. При наличии стержня электрическое поле имеет горизонтальную \mathbf{E}_\perp и вертикальную \mathbf{E}_\parallel составляющие, причем \mathbf{E}_\perp в основном обусловлена искажением приложенного поля вследствие установки стержня, имеющего тот же потенциал, что и система 1–2. Таким образом, движение газа по направлению к стержню обусловлено как действием силы \mathbf{f}_\parallel , которая прижимает газ к сетке 2, что способствует уширению пламени, так и действием силы \mathbf{f}_\perp , которая непосредственно направлена к стержню.

Отсутствие тока J_3 на стержень при $0 < \varphi < 8$ кВ связано с тем, что, согласно п. 2, при положительном потенциале горелки вблизи системы 1–2 сосредотачивается заряд электронов, но их концентрация на несколько порядков меньше, чем концентрация положительных ионов при отрицательном потенциале горелки. Этим же обстоятельством обусловлено и отсутствие отклонения пламени в сторону стержня: величина параметра S оказывается значительно меньше, чем при отрицательном потенциале горелки.

4. Экстракция сажи. Деформация пламени при наличии стержня по мере увеличения модуля отрицательного потенциала горелки представлена на фиг. 3–5. Исходная конфигурация пламени при $\varphi = 0$ показана на фиг. 3, а. Пламя при этом имеет высоту 40 мм; на фигуре также указана измеренная с помощью оптического пирометра температура пламени в двух его характерных точках.

При возрастании φ пламя начинает отклоняться в сторону стержня, не прикасаясь к нему (фиг. 3, б). При еще большем потенциале ($\varphi = -9$ кВ) пламя полностью “охватывает” стержень (фиг. 4), на котором начинается осаждаться сажа. При увеличении времени эксперимента слой сажи на стержне нарастает в виде ветвистого дерева (фиг. 5, а). Вид стержня с наросшей на нем сажой после прекращения эксперимента показан на фиг. 5, б. Сажа имеет рыхлую, нерассыпающуюся структуру.

Обсудим механизм попадания частиц сажи на стержень. Рассмотрим вначале эксперименты, когда на системы 1–2 и 3 (горелка, нижняя сетка и стержень) подается отрицательный потенциал ($\varphi < 0$). В этом случае (разд. 3) частицы сажи в примыкающей к системе 1–2 зоне оказываются положительно заряженными, поэтому принципиаль-



Фиг. 3. Деформация пламени при установке металлического стержня и наложении электрического поля: *а* – электрическое поле отсутствует; *б* – $\phi = -3$ кВ. В точке 1 $T = 1120$ К, в точке 2 $T = 1470$ К

но возможен механизм попадания на стержень заряженных частиц сажи вследствие действия на них поля E_{\perp} . Однако такой механизм в рассматриваемых экспериментах не является определяющим. Докажем это.

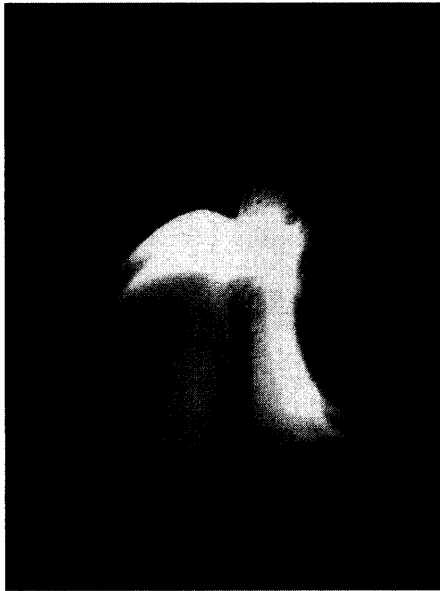
Имеются два способа зарядки частиц в пламени при наличии поля E . Первый – диффузионный механизм – обусловлен наличием положительных ионов и их диффузией к поверхности частицы в ее окрестности. Максимальный заряд q_1 частицы радиуса r равен $q_1 = rD_i/b_i$, где D_i – коэффициент диффузии ионов, b_i – их подвижность [7]. Второй способ зарядки обусловлен движением положительных ионов в электрическом поле по направлению к частице сажи с последующим их осаждением. В этом случае максимальный заряд q_2 частиц сажи равен $q_2 = 3r^2E$ [7]. Максимально возможная подвижность частиц сажи в электрическом поле равна

$$b_s = \frac{q}{6\pi\mu r} \left(1 + 0.86 \frac{\lambda}{r} \right), \quad q \approx q_1 + q_2 \quad (4.1)$$

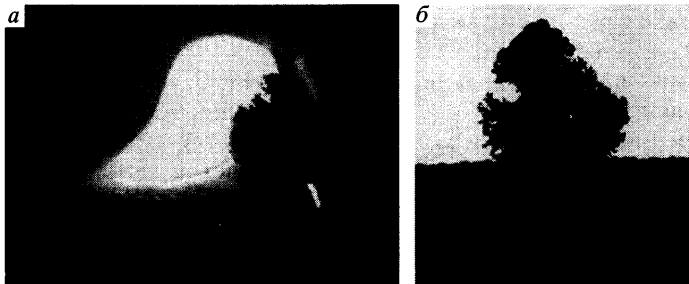
где μ и λ – средние значения коэффициента динамической вязкости газа в пламени и длины свободного пробега в нем молекул [5, 8]. Рассмотрим условия: $E = 1.5$ кВ/см, $b_i = 2$ см²/(В · с), $D_i = 0.1$ см²/с, $\mu = 5 \cdot 10^{-4}$ г/(см · с), $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ см, приблизительно соответствующие проведенным экспериментам. Для частиц сажи радиуса 0.01 и 0.1 мкм соответствующие величины представлены в таблице.

r , мкм	Z_1	Z_2	Z	v_s , м/с
0.01	0.35	0.03	0.38	4.2
0.1	3.5	3.1	6.6	0.9

где $v_s = b_s E$ – скорость дрейфа частиц сажи в электрическом поле, Z_1 , Z_2 и Z – число элементарных зарядов на частице с зарядами q_1 , q_2 и q . При $r = 0.01$ мкм (малый размер частиц) дисперсная фаза в основном заряжается диффузионным механизмом, а при $r = 0.1$ мкм диффузионная зарядка частиц и их зарядка в электрическом поле приблизительно одинаковы.



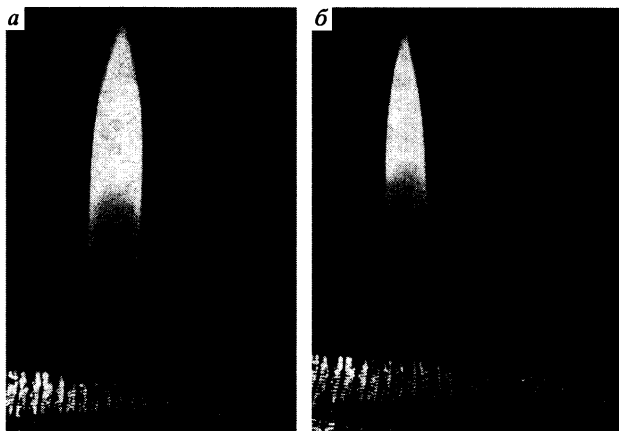
Фиг. 4. Пламя при $\varphi = -9$ кВ. Весь стержень находится в пламени



Фиг. 5. Экстракция сажи из пламени: *a* – $\varphi = -9$ кВ, стержень находится в пламени длительное время; *б* – стержень с древовидным отложением сажи после прекращения эксперимента

Проведенные оценки показывают, что скорость дрейфа частиц сажи в электрическом поле намного меньше, чем скорость газа (составляющая несколько м/с), и поэтому движение заряженных частиц сажи относительно газа за счет поля E по направлению к горелке незначительно.

Гидродинамическое отставание частиц сажи таких малых размеров от газодинамического потока также невелико. Действительно, время динамической релаксации $\tau = (m/6\pi\eta r)(1 + 0.86\lambda/r)$, $m = (4/3)\pi r^3 \rho_s$, где ρ_s – плотность материала частиц. При $r = 0.01$ и 0.1 мкм величина $\tau = 2 \cdot 10^{-8}$ и $5 \cdot 10^{-7}$ с. Это время намного меньше характерного газодинамического времени $l/v \sim 10^{-2}$ с, где l и v – характерные размер задачи и скорость газа. Из всех проведенных оценок следует, что частицы сажи “вморожены” в газ. Этот вывод, основанный на оценках для частиц очень малого размера, сделан с большим запасом, поэтому “вмороженность” в поток частиц сажи имеет место и для частиц большего размера, которые образуются в потоке в результате коагуляции мелких частиц.



Фиг. 6. Пламя при положительном потенциале горелки: а – $\varphi = 0$, б – $\varphi = 9\text{кВ}$

Так как пламя вследствие ЭГД взаимодействия отклоняется к стержню и охватывает его (см. п. 3), замороженные в газ частицы сажи непосредственно попадают в ближайшую окрестность стержня.

Пусть теперь на горелку и стержень подается положительный потенциал ($\varphi > 0$). В этом случае вблизи системы 1–2 сосредотачиваются электроны. Как следует из фиг. 6, осаждение сажи на стержень в этих экспериментах не происходит. Это связано с двумя обстоятельствами.

Первое состоит в том, что, как было показано в п. 3, вследствие относительно малой концентрации электронов соответствующий параметр ЭГД взаимодействия является малым и отклонение пламени в сторону стержня отсутствует.

Во-вторых, скорость электрического дрейфа частиц сажи, которые зарядились вследствие наличия вблизи них электронов, как и в рассмотренном выше случае (отрицательная горелка), также мала. Для доказательства этого заключения заметим, что скорость дрейфа в электрическом поле отрицательно заряженных частиц сажи также определяется формулой (4.1), где q_1 и q_2 – абсолютные значения отрицательных зарядов частиц, приобретенных ими вследствие диффузии электронов и их направленного движения в электрическом поле. Величина q_2 остается такой же, как и в случае $\varphi < 0$. Величина q_1 записывается в виде

$$q_1 = \frac{rD_e}{b_e} = \frac{rkT_e}{e} \left(D_e = \frac{kT_e}{e} b_e \right) \quad (4.2)$$

Здесь использована формула Эйнштейна, где T_e и b_e – температура и подвижность электронов. Заметим, что величину q_1 в случае отрицательно заряженной горелки также можно представить в виде $q_1 = (kT_i/e)r$, где T_i – температура ионов, практически равная температуре газа. Принимая $T_e \sim T_i$, находим, что величины q_1 для обоих вариантов ($\varphi > 0$ и $\varphi < 0$) приблизительно одинаковы, поэтому, согласно формуле (4.1), скорость дрейфа отрицательно заряженных частиц сажи в рассматриваемом случае положительно заряженной горелки остается столь же малой, как и при подаче на нее отрицательного потенциала.

Заключение. Проведенные эксперименты показывают, что при подаче на горелку, создающую ламинарное диффузионное пламя, отрицательного потенциала ($|\varphi| \leq 9\text{кВ}$) происходит существенная перестройка газодинамического течения в пламени. Это обусловлено тем, что в примыкающей к срезу горелки области сосредото-

чивается заряд положительных ионов и возникает действующая на поток электрогазодинамическая сила. Находящиеся в этой области частицы сажи приобретают положительный заряд, но их скорость дрейфа в электрическом поле мала (составляет несколько см/с при скорости газа порядка нескольких м/с), поэтому частицы сажи (если также учесть их чрезвычайно малое время динамической релаксации) заморожены в газ.

При установке вне пламени (но вблизи него) металлического стержня происходит отклонение к нему пламени (вплоть до его охвата). Это происходит в результате появления направленных к стержню составляющих электрического поля и электрогазодинамической силы. Частицы сажи, замороженные в натекающий на стержень поток газа, попадают в ближайшую окрестность поверхности стержня, и часть их (с наибольшим размером) на нем осаждаются.

При подаче на горелку положительного потенциала деформация пламени в его нижней части не происходит. Это связано с тем, что электрогазодинамическая сила в примыкающей к срезу горелки области, в которой сосредотачиваются электроны, вследствие их относительно малой концентрации, значительно меньше, чем в случае $\varphi < 0$. В связи с этим при установке рядом с пламенем стержня поток не отклоняется в его сторону, и осаждение сажи на нем отсутствует.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 02-01-00478).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lawton J., Weinberg F.* Electrical Aspects of Combustion. Oxford: Clarendon Press. 1969. 356 p.
2. *Kono M., Carleton F.B., Jones A.R., Weinberg F.* The effect of nonsteady electric fields on sooting flames // *Combustion and flame*. 1989. V. 78. № 3–4. P. 357–364.
3. *Mayo P.J., Weinberg F.* On the size, charge and number-rate of formation of carbon particles in flames subjected to electric field // *Proc. Roy. Soc. London. Ser. A*. 1970. V. 319, № 1538. P. 351–371.
4. *Wagner H.G.* Soot formation in combustion // *Proc. 17th Intern. Symp. on Combustion*. Pittsburgh: The Combustion Inst. 1979. P. 3–19.
5. *Ватажин А.Б., Лухтер В.А., Сенин В.А., Шульгин В.И.* Влияние электрического поля на эмиссию окислов азота и структуру ламинарного диффузионного пламени // *Изв. РАН. МЖГ*. № 2. 1995. С. 13–23.
6. *Onischuk A.A., di Stasio S., Karasev V.V., Baklanov A.M., Makhov G.A., Vlasenko A.L., Sadykova A.R., Shipovalov A.V., Panfilov V.N.* Evolution of structure and charge of soot aggregates during and after formation in a propane/air diffusion flame // *J. Aerosol. Sci.* 2003. 34. P. 383–403.
7. *Верецагин И.П., Левитов В.И., Мирзабекян Г.З., Пашин М.М.* Основы электрогазодинамики дисперсных систем // М.: Энергия. 1974. 480 с.
8. *Ватажин А.Б., Грабовский В.И., Лухтер В.А., Шульгин В.И.* Электрогазодинамические течения. М.: Наука. 1983. 344 с.