

## ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ГОРЮЧЕЙ СМЕСИ НА ВИХРЕВУЮ СТРУКТУРУ ПЛАМЕНИ

В. П. Самсонов

Сургутский государственный университет, 628400 Сургут, samsonov@surgu.wsnet.ru

Исследовано влияние состава смеси пропана с воздухом на самопроизвольно возникающую структуру «опрокинутого» вихревого пламени при горении газа, вдуваемого на нижнюю поверхность пластины, наклоненной относительно горизонта. Установлено, что угловая скорость продуктов горения определяется ориентацией вектора скорости вдува газа относительно направления силы тяжести, скоростью в сопле горелки и составом горючей смеси. Показано, что при изменении состава горючей смеси происходит перестройка поля скоростей в вихревой структуре, приводящая к изменению распределений концентраций и температур в пламени. Получены зависимости высоты пламени и полноты сгорания горючей смеси от скорости вдува и содержания пропана.

Ключевые слова: вихревая структура, температура, сгорание газа, тепловой поток.

Целесообразность закрутки потока в пламени для получения необходимых интенсивностей тепло- и массообмена и полноты сгорания топлива хорошо известна [1, 2]. Существует ограниченное число гидродинамических ситуаций, когда устойчивое вращательное движение газа в пламени возникает спонтанно. Влияние самопроизвольных вихревых структур на тепло- и массоперенос в ячеистых диффузионных пламенах при горении этанола «под потолком» на плоской пористой горелке рассмотрено в работах [3, 4], где отмечена значительная роль силы тяжести, приводящей к бенаровской конвекции в продуктах горения в слое «под потолком», так как при этом потенциальная энергия нагретого газа превращается в кинетическую энергию вращательного движения. В богатых смесях этанола с воздухом происходит дробление поверхности пламени на отдельные ячейки в результате развития теплодиффузионной неустойчивости. Структура пламени в отдельной вихревой ячейке в [3, 4] не рассматривалась. Сведения о других исследованиях самопроизвольных вихревых пламен отсутствуют.

Целью данной работы является изучение закономерностей изменения высоты вихревого «опрокинутого» пламени, скорости вращения и полноты сгорания газа в широком диапазоне составов пропановоздушной смеси.

Самопроизвольное вихревое пламя получали при сжигании горючих смесей, вдуваемых через отверстие в горизонтальной или

наклоненной под углом  $20^\circ$  плоской пластине из нержавеющей стали. Нижнюю поверхность пластины, на которую вдували газ, тщательно шлифовали и полировали до зеркального блеска. Объемную концентрацию пропана изменяли от 2,4 до 100 %. Горючие смеси готовили в газометре вытеснения с точностью до 0,1 %. Состав смеси контролировали интерферометром Рэлея ИТР-1. Расход горючей смеси измеряли по перепаду давления на калиброванном капилляре. Свечение пламени и траектории светящихся несгоревших частиц углерода снимали кинокамерой АКС с максимальной частотой 150 кадр/с. По обмерам фотографий определяли высоту пламени и рассчитывали угловую скорость вихревого движения газа. В соответствии с результатами работ [5, 6] угловую скорость регулировали путем изменения направления и значения скорости вдува газа. Температуру поверхности пламени измеряли по интенсивности излучения яркостным пирометром, а на поверхности пластины — термомпарой. Распределение углерода внутри конуса пламени для различных условий опытов определяли по сажевым следам, оставляемым продуктами сгорания на поверхности пластины.

Толщина слоя сажи изменяется в соответствии с полями скоростей, температур и концентраций частиц углерода в газовой фазе. Подбором времени осаждения продуктов сгорания на зеркальную поверхность пластины добивались разделения следа на прозрачную

и непрозрачную области. Прозрачная область при наблюдении в отраженном свете дает интерференционную картину, образованную интерференцией света в тонком клине. Интерференционные полосы представляют собой линии равной толщины и, следовательно, равной концентрации углерода. С известной точностью, как показано в [6], по расположению интерференционных полос можно судить о распределениях температур и скоростей внутри конуса пламени, учитывая, что для газов число Прандтля  $Pr = a/\lambda \approx 1$ . Здесь  $a$  и  $\lambda$  — температуропроводность и теплопроводность продуктов горения. В непрозрачной области толщина сажевого следа превышает длину когерентности лучей света, отраженных от поверхности пластины и внешней поверхности слоя; кроме того, след образован частицами, размеры которых значительно больше длины волны видимого света. Прозрачная и непрозрачная области света отделены границей, ширина которой равна  $\approx 0,05$  мм. Толщину слоя в непрозрачной области измеряли с помощью микроскопа. Для этого в слое сажи делали узкий соскоб и, фокусируя поверхности пластины и сажевого слоя, измеряли вертикальное перемещение микроскопа. Было обнаружено, что в зависимости от толщины непрозрачного слоя его поверхность обладает различной отражательной способностью. Это проявлялось в том, что изображение слоя аналогично интерференционной картине представляло собой систему полос различной яркости, являющихся линиями равной толщины. Оптические свойства сажевого слоя использовали для контроля массы сажи, отложившейся на обтекаемой поверхности. Прямое измерение массы сажи осуществляли путем ее удаления с поверхности пластины и последующего взвешивания на электронных весах с точностью до  $10^{-2}$  мг.

На рис. 1 представлена фотография свечения вихревого пламени при вертикальном вдуве смеси 60 % пропана с воздухом со скоростью, соответствующей числу Рейнольдса  $Re = vd/\nu = 150$ , где  $v$  — скорость газа на срезе горелки (отверстия вдува),  $d$  — диаметр горелки,  $\nu$  — кинематическая вязкость. Видны траектории светящихся частиц углерода в виде темного кольца. Область яркого свечения, в которой происходит догорание частиц углерода, по высоте пламени совпадает с центром кольцевого вихря. Из обмеров фотографий свечения пламени, полученных в интервале чисел

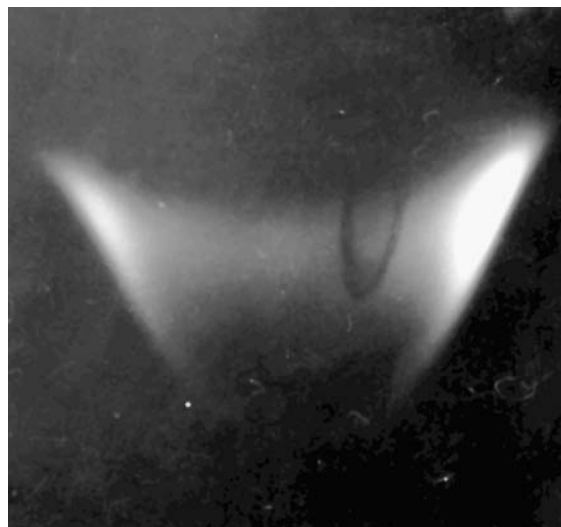


Рис. 1. Фотография свечения вихревого пламени при горении смеси 60 % пропана с воздухом

$Re \approx 80 \div 200$ , следует, что с достаточной точностью поверхность пламени можно считать конической. Радиус пламени обратно пропорционален вертикальной координате, отсчитываемой от поверхности вдува. При  $Re \leq 80$  и  $Re \geq 200$  поверхность пламени имеет более сложную форму. За высоту пламени принимали высоту светящегося конуса.

На рис. 2 представлены результаты измерения высоты пламени при различных скоростях вдува и составах горючей смеси. Безразмерная высота определена как отношение высоты конуса пламени  $h$  к диаметру горелки  $d$ . Диаметр горелки изменяли от 1 до 12 мм. В интервале значений  $Re = 0 \div 200$  высота пламени почти прямо пропорциональна скорости вдува газа. При  $Re \geq 200$  пламя теряет устойчивость, начиная совершать вертикальные колебания, а течение в пламени становится турбулентным. Погрешность измерения высоты пламени при этом возрастает, а линейная зависимость  $h/d \sim Re$  нарушается. Из рис. 2 видно, что высота пламени уменьшается при разбавлении богатой горючей смеси воздухом. При одинаковой высоте диффузионного факела и пламени стехиометрической смеси угловая скорость вихревого движения в пламени стехиометрической смеси увеличивается в несколько раз.

«Опрокинутое» пламя относится к пламенам, реализуемым в противонаправленных струях [7]. Строгая математическая теория

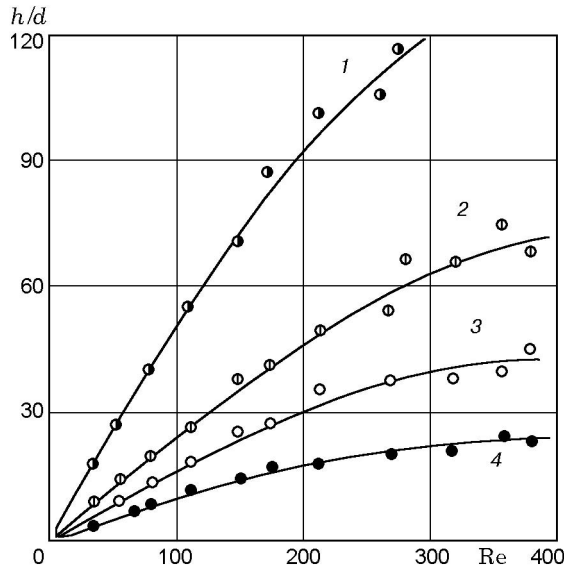


Рис. 2. Зависимость безразмерной высоты «опрокинутого» пламени от скорости ддува газа и состава горючей смеси:

1 — диффузионное пламя пропана; 2-4 — пламена при горении смесей воздуха соответственно с 50, 30 и 10 % пропана,  $Re = 45$

противоточного диффузионного пламени развита лишь для потенциальных течений горючего газа и окислителя [8, 9]. Теоретического описания вихревого противоточного пламени нет. Закономерности влияния силы тяжести и скорости газа на высоту пламени для различных составов горючих смесей, представленные на рис. 2, могут быть описаны качественно путем оценки потоков тепла, импульса и изменения скорости течения нагретого газа под воздействием подъемных сил, как это сделано в [10, 11]. Вихревое течение приводит к перемешиванию газа внутри конуса пламени, устанавливая некоторое среднее значение разности температур пламени и окружающего воздуха. Пусть  $v_z$  — среднее по сечению значение вертикальной составляющей скорости газа,  $z$  — координата вдоль потока, отсчитываемая от среза горелки. Тогда условие постоянства теплового потока  $q$  вдоль оси пламени можно записать как

$$q = \rho c_p T v_z \pi R^2 = \text{const.} \quad (1)$$

Здесь  $\rho$  и  $c_p$  — плотность и удельная теплоемкость газа при постоянном давлении,  $T$  — температура,  $R$  — радиус поперечного сечения пламени. Из результатов экспериментов следует, что с удовлетворительной точностью

$R \sim 1/z$  при  $Re \approx 80 \div 200$ . Следовательно,  $T v_z / z^2 \sim q / \rho c_p$ . Вектор потока импульса через поперечное сечение пламени  $\rho v_z^2 R^2$  пропорционален  $\rho v_z^2 / z^2$ . Изменение вертикальной составляющей скорости определяется действующей на струю подъемной силой:

$$\rho g \beta T R^2 \sim \rho g \beta T / z^2. \quad (2)$$

С учетом (1) соотношение (2) принимает вид  $\rho g \beta T / z^2 \sim g \beta q / c_p v_z$ .

Тогда вектор потока импульса в вертикальном направлении изменяется по соотношению:  $\frac{d}{dz} \left( \rho v_z^2 \frac{1}{z^2} \right) \sim \frac{g \beta q}{c_p v_z}$ , откуда окончательно для высоты пламени, т. е. максимально возможного значения координаты частицы газа внутри конуса пламени, получаем

$$z \sim v_z \left( \frac{c_p \rho}{g \beta q} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (3)$$

Соотношение (3) согласуется с экспериментальными зависимостями в диапазоне чисел  $0 \leq Re \leq 200$ .

Скорость тепловыделения в пламени определяет значения  $q$ . Для смесей, близких к стехиометрическим, тепловой поток возрастает, приводя к уменьшению высоты пламени. Высота вихревого пламени влияет на потоки тепла и массы перемешивающихся во встречных струях горючего газа и воздуха в направлении, перпендикулярном обтекаемой поверхности. Увеличение этих потоков авторы работы [3] связывают с возникновением дополнительной кинетической энергии вращательного движения продуктов горения в поле силы тяжести. Изменение состава смеси приводит к перестройке поля скоростей и распределений температур и концентраций внутри конуса пламени.

На рис. 3 представлены интерференционные картины сажевых следов вихревых пламен, полученных при диффузионном горении пропана и горении смеси 60 % пропана с воздухом. Темные кружки на фотографиях — изображения отверстий ддува газа. Их диаметры одинаковы и равны 1 мм. Обе фотографии получены при расходе газа, соответствующем числу  $Re = 45$ . Время экспозиции сажевых следов на поверхность пластины для фотографий на рис. 3, а, б равно 15 и 35 с соответственно. Угол наклона поверхности обтекания относительно горизонта  $20^\circ$ . Пластины наклоняли

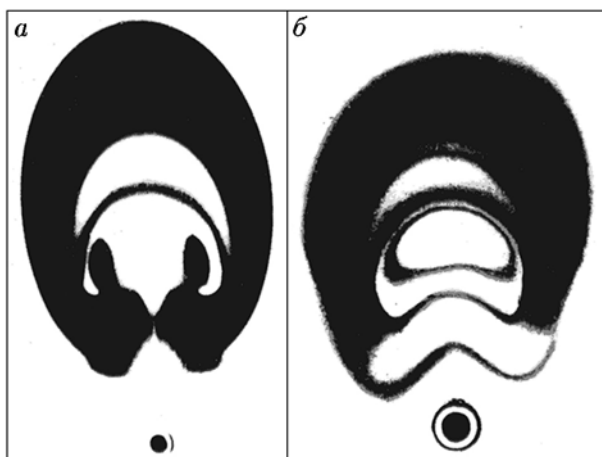


Рис. 3. Сажевые следы вихревых пламен:

*a* — диффузионное пламя пропана, время экспозиции 15 с,  $Re = 45$ ; *б* — пламя при горении смеси 60 % пропана с воздухом, время экспозиции 35 с,  $Re = 45$

для того, чтобы след давал больше информации о течении внутри конуса пламени. В случае горизонтального расположения пластины изображение сажевого следа представляло собой концентрические относительно отверстия вдува окружности — линии равной толщины слоя сажи. Сравнение фотографий на рис. 3, *a, б* показывает, что площадь поверхности сажевого следа при разбавлении горючей смеси воздухом уменьшается в несколько раз. Измерениями установлено, что площадь поверхности сажевого следа пропорциональна высоте пламени. Вместе с изменением площади сажевого следа и высоты пламени изменяются поля скоростей, температур и концентраций внутри конуса пламени.

На рис. 3, *a* представлена картина вихревого течения в диффузионном пламени. Несгоревшие частицы сажи, двигаясь вдоль линий тока, визуализируют стационарный кольцевой вихрь, стабилизированный вблизи отверстия вдува горючего газа. В зоне вихря, ограниченной узкой интерференционной полосой, толщина следа минимальна, вычисляется по порядку интерференции и кратна длине волны света:  $\approx 10^{-6} \div 10^{-5}$  м. Вне области вихря, соответствующей темному непрозрачному участку следа, сгорание газа неполное, а толщина следа изменяется от 0,1 до 0,5 мм. С уменьшением концентрации пропана в горючей смеси уменьшается высота пламени и возрастает угловая скорость продуктов горения в вихре. Конус пламени становится более устойчивым, а область вихрево-

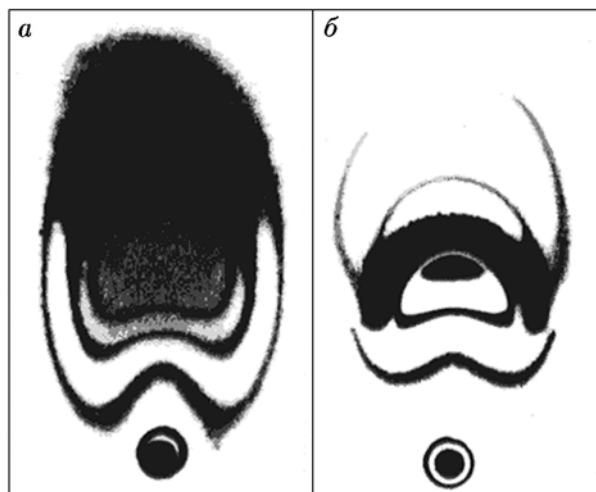


Рис. 4. Сажевые следы пламен:

*a* — невихревое пламя при горении смеси 30 % пропана с воздухом,  $Re = 45$ ; *б* — вихревое пламя при горении смеси 30 % пропана с воздухом,  $Re = 45$

го движения приобретает строго очерченные границы. На рис. 3, *б* область вихря ограничена замкнутой темной интерференционной полосой второго порядка (счет порядка интерференции ведется с края следа). Вследствие более полного сгорания горючей смеси сажевый след в области вихря прозрачен, а порядок интерференции пропорционален температуре пламени в пограничном слое [6]. Из сравнения рис. 3, *a, б* видно, что с приближением концентрации пропана к стехиометрическому соотношению в вихревом пламени распределение температур изменяется. Внутри вихревой ячейки температура максимальна и распределена равномерно вследствие интенсивного перемешивания газа. Свободно-конвективное течение воздуха на рис. 3 направлено вертикально вверх. Относительно набегающего потока воздуха вихревая ячейка имеет наветренную и подветренную стороны. Более полное смешение горючей смеси с воздухом происходит с наветренной стороны. С увеличением скорости вращения газа в вихревой ячейке площадь поверхности сажевого следа с подветренной стороны уменьшается.

Скорость вращения газа зависит от линейной скорости на срезе горелки и от ориентации оси горелки относительно вертикали. Наибольшая угловая скорость продуктов горения в пламени достигается при вертикальном вдуве горючей смеси. Уменьшения угловой скорости добивались, вдувая горючую смесь под разными углами относительно плоскости пласти-

ны при неизменном положении самой пластины. Условия развития свободно-конвективного течения под поверхностью пластины оставались при этом неизменными. Влияние вихревого движения на структуру пламени иллюстрирует рис. 4. Фотографии сажевых следов невихревого и вихревого пламени получены при горении одной и той же смеси (30 % пропана с воздухом), одинаковой скорости вдува, соответствующей числу  $Re = 45$ , угле наклона пластины относительно горизонта  $20^\circ$  и одинаковом времени экспозиции сажевого следа. Невихревое пламя получено при вдуве горючей смеси под углом  $40^\circ$  относительно вертикали. Масштабы фотографий одинаковы. На рис. 4, *a* видно, что невихревое «опрокинутое» пламя не отличается от обычного, когда вектор скорости газа на срезе горелки направлен вертикально вверх. Непрозрачная часть сажевого следа, соответствующая области догорания, располагается вниз по потоку и занимает около половины площади следа. Характерным отличительным признаком сажевого следа вихревого пламени является обрыв интерференционной линии на границе между наветренной и подветренной сторонами вихревой ячейки. При увеличении скорости вращения газа в вихревой ячейке обрыв наблюдается для линий, соответствующих интерференционным минимумам второго — третьего порядков. Рис. 4, *b* наглядно иллюстрирует обрыв интерференционной линии первого порядка. Обрыв свидетельствует о том, что толщина сажевого следа в данной точке скачкообразно уменьшается до нуля. Это связано с деформацией поля скоростей под влиянием вихревой ячейки. На рис. 4, *b* видно, что сажевый след вихревого пламени при горении обедненной смеси занимает меньшую площадь по сравнению с невихревым пламенем. Область догорания расположена с подветренной стороны вихря. Она отделена от вихревой ячейки очень узкой границей, а ее площадь по сравнению с невихревым пламенем сократилась в несколько раз.

Полноту сгорания горючей смеси оценивали по количеству прореагировавшего углерода исходя из реакции конечного химического превращения пропана:  $C_3H_8 + 5O_2 = 3CO_2 + 4H_2O$ . Полное сгорание горючей смеси предполагает окисление углерода и водорода. Измерение количества прореагировавшего водорода в условиях данного эксперимента невозможно. Осаждение сажи на обтекаемой поверхности дела-

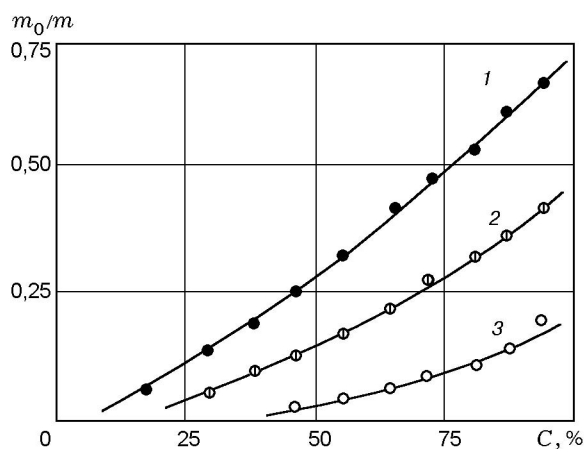


Рис. 5. Зависимость полноты сгорания горючей смеси от концентрации пропана в смеси с воздухом и от частоты вращения газа в вихре:

1–3 — для частот 10, 32, 47 Гц соответственно

ет доступными измерения части непрореагировавшего углерода, содержавшегося в исходной горючей смеси. По результатам измерений массы сажевого следа  $m_0$  рассчитывали полноту сгорания горючей смеси  $m_0/m$ . Здесь  $m$  — масса углерода в исходной горючей смеси.

Время экспозиции сажи на обтекаемой поверхности в зависимости от состава горючей смеси изменяли от 20 с при горении богатых смесей до нескольких минут при горении бедных смесей. Расход горючей смеси изменяли от  $10^{-6}$  до  $2 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с, а диаметры отверстий вдува газа — от 1 до 10 мм. Масса осаждаемой на поверхности пластины сажи в указанных условиях опытов изменялась от 16 до 20 мг. Массу углерода в исходной смеси определяли по концентрации пропана и объемному расходу горючей смеси за время экспозиции сажи на поверхность. Результаты экспериментов представлены на рис. 5 в виде зависимости величины  $m_0/m$  от концентрации  $C$  пропана в смеси. Зависимости получены для спонтанных вихревых пламен с различными скоростями вращения газа в вихре, соответствующими циклическим частотам 10, 32 и 47 Гц. Видно, что увеличение полноты сгорания при одинаковом содержании пропана в смеси зависит от скорости вращательного движения. Очевидно, это связано с возрастанием интенсивности конвективного переноса кислорода из окружающего воздуха в зону горения. Полученный результат не противоречит выводам работы [3], согласно которым скорость тепло- и массоперено-

са определяется действием силы тяжести из-за превращения кинетической энергии поступательного движения газа во вращательное. Закономерности сгорания газа в «опрокинутом» пламени с использованием эффекта самопроизвольного вихребразования при малых числах Рейнольдса могут быть использованы для повышения экономичности горелочных устройств небольшой мощности.

### ВЫВОДЫ

1. Экспериментально обнаружено, что при изменении концентрации пропана в смеси с воздухом в сторону стехиометрического соотношения высота «опрокинутого» пламени уменьшается. При этом скорость вращательного движения продуктов горения в вихревой ячейке, вызванного торможением газа в струе, возрастает.

2. Увеличение скорости газа в вихревой ячейке изменяет поле скоростей внутри конуса пламени. При этом возрастают градиенты скоростей вблизи границы областей вихревого и потенциального течений.

3. Возрастание интенсивности тепло- и массопереноса обусловлено вихревым течением. Визуально это проявляется в прерывании интерференционных линий на изображении сажевого отпечатка, оставляемого пламенем. Наиболее значительны изменения температуры и концентрации на границах вихревой ячейки. Полнота сгорания горючей смеси увеличивается с ростом скорости вращения продуктов горения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Вулис Л. А., Ярин Л. П. Аэродинамика факела. Л.: Энергия, 1978.
2. Гупта А., Лили Д., Сайред Н. Закрученные потоки. М.: Мир, 1987.
3. Orloff L., de Ris J. Cellular and turbulent ceiling fires // Combust. Flame. 1972. V. 18. P. 389–401.
4. De Ris J., Orloff L. The role of buoyancy direction and radiation in turbulent diffusion flames on surfaces // Proc. of 15th Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh: The Combustion Inst., 1974. P. 175–182.
5. Алексеев М. В., Самсонов В. П., Фатеев И. Г. Закономерности спонтанного образования вихревого диффузионного пламени // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 6. С. 47–50.
6. Самсонов В. П. Исследование структуры пламени в пограничном слое методом осаждения сажи на поверхность // Хим. физика. 1992. Т. 11, № 11. С. 1580–1587.
7. Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович, Г. М. Махвиладзе. М.: Наука, 1980.
8. Fendell F. E. Ignition and extinction in combustion of initially unmixed reactants // J. Fluid Mech. 1965. V. 21, N 2. P. 281–304.
9. Кидин Н. И., Махвиладзе Г. М. Электрические свойства диффузионного пламени противонаправленных струй // Инж.-физ. журн. 1977. Т. 32, № 6. С. 1034–1042.
10. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. М.: Наука, 1988.
11. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров. М.: Стройиздат, 1990.

*Поступила в редакцию 11/VI 2002 г.*