

Рис. 3. Зависимость $T(0, t)$ для нагрева пластины треугольным импульсом с $a=10^6$ Вт/(см²·с) и $\tau=0,04$ с (1) и прямоугольным с $q=2 \cdot 10^4$ Вт/см² (2).

1) предложенная модель качественно правильно описывает процесс высокотемпературного окисления металлических пластин с учетом фазовых переходов, изменения толщины окисной пленки и т. д. и позволяет определить момент воспламенения материала;

2) темп нагрева и окисления металлической пластины определяется не только вложенной энергией, но зависит от временной формы теплового импульса.

$T(0, t)$ при нагреве треугольным импульсом. Видно, что момент воспламенения пластины в этом случае наступает примерно в 2 раза быстрее, чем при нагреве прямоугольным импульсом. Затраченная энергия составляет ~75% от энергии прямоугольного импульса.

Рассчитанное в настоящей работе значение температуры воспламенения титановой пластины (~1750°C) примерно совпадает с экспериментальными величинами, полученными в [2] при высокотемпературном окислении пластин в атмосфере нагретого окислителя и в [3, 4] при воздействии мощного излучения на тонкие фольги в воздухе, и заведомо превышает значения температуры воспламенения металлических частиц в потоке нагретого газа-окислителя [5].

На основании результатов данной работы можно сделать следующие выводы:

Поступила в редакцию 23/1 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. В. С. Савинич. Физ. и хим. обработки материалов, 1977, 1, 33.
2. В. Н. Ковалев, В. К. Мельников. ФГВ, 1978, 14, 3, 14.
3. А. М. Бонч-Бруевич, М. Н. Либенсон и др. Письма в ЖТФ, 1977, 3, 5, 193.
4. В. Л. Володькина, М. Н. Либенсон и др. Резка тонкослойных материалов излучением СО₂-лазера. Л., 1973.
5. А. Л. Брейтер, В. М. Мальцев, Е. И. Попов. ФГВ, 1977, 13, 4, 558.

УДК 536.46

УПРОЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ «ПРИПОДНЯТОГО» ТУРБУЛЕНТНОГО ДИФфуЗИОННОГО ФАКЕЛА

А. Б. Лебедева
(Москва)

Известно [1], что процесс турбулентного диффузионного горения в стабилизированных пламенах определяется в основном смешением. Если предположить, что скорость химической реакции бесконечно велика и считать, что коэффициенты молекулярного переноса равны друг другу и скорость мала, то кинетику можно не рассматривать. В этом случае все скалярные параметры течения (плотность, температура и т. д.) однозначно выражаются через концентрацию пассивной примеси z [1, 2]. При смешении горючего и окислителя без горения плотность также можно представить в виде зависимости от концентрации. Таким образом, определяющие системы уравнений для задач о смешении негорящих газов и диффузионного горения отличаются только видом уравнения состояния, т. е. зависимостью плотности от концентрации [2—4]. Для негорящего потока имеет место зависимость $\rho_1 = m_2/[m_1 + z(m_2 - m_1)]$, для факела горения — $\rho_2 = (A_1 + A_2 z)/(A_3 + A_4 z)(A_5 + A_6 z)$, где ρ_1 и ρ_2 — мгновенные плотности в струе и в факеле, m_1, m_2 — молекулярные веса смешиваемых компонентов, A_1, A_2, \dots, A_6 — коэффициенты, зависящие от теплового эффекта реакции, стехиометрических коэффициентов, молекулярных весов, начальных условий, удельных теплоемкостей реагентов.

В ряде случаев при раздельной подаче горючих компонентов возможны такие режимы, когда пламя отрывается от кромок сопла, через которое происходит подача топлива. При теоретическом исследовании особенностей течения в «приподнятом» факеле наибольшая сложность связана с расчетом области воспламенения, где необходимо учитывать кинетику химических реакций и использовать полную систему уравнений Навье — Стокса. В связи с этим в настоящее время имеются только критерийные подходы для описания течения в турбулентном «приподнятом» факеле [5, 6].

В данной работе процесс воспламенения в «приподнятом» факеле не рассматривается. Основное внимание уделено исследованию характера поведения ряда важных с практической точки зрения параметров течения — полноте сгорания, длине и ширине факела. Рассмотрим течение в турбулентном диффузионном «приподнятом» факеле. Предположим, что

1) во всей области течения справедливо приближение пограничного слоя;

2) воспламенение происходит в области конечной длины («области перехода», длина которой составляет несколько калибров, определенных по радиусу сопла). Для плотности в «области перехода» справедлива аппроксимация

$$\langle \rho \rangle = (1 - \delta) \langle \rho \rangle_1 + \delta \langle \rho \rangle_2, \quad (1)$$

где $0 \leq \delta \leq 1$ — функция продольной координаты вида $\delta = (x - x_1)/(x_2 - x_1)$; $x_1 = x_1/R$, $x_2 = x_2/R$ — абсциссы начального (сечение воспламенения) и конечного сечений в «области перехода»; R — радиус сопла; $\langle \rangle$ — скобки осреднения;

3) до сечения воспламенения, координата которого x_1 задается из опыта, справедлив подход, разработанный для расчета смещения струй без горения, а за «областью перехода» — для стабилизированных пламен (присоединенных факелов) [2—4].

Исходная система уравнений, описывающая турбулентные течения струйного типа при наличии диффузионного горения, представляла собой уравнения движения, диффузии, состояния и неразрывности. Эта система замыкалась с помощью двухпараметрической модели турбулентности — полуэмпирических уравнений относительно энергии турбулентности и турбулентной вязкости [2—4]. Расчеты проводились в «квазиламинарной» постановке с использованием методики численного интегрирования системы уравнений параболического типа. Проводились также расчеты смещения струй без горения и присоединенных факелов горения метана и пропана в воздухе.

Прежде всего проводилось методическое исследование влияния параметров x_1 и x_2 в формуле (1) на результаты расчетов «приподнятых» факелов. Известно [7—9], что при низких скоростях течения экспериментальные значения координаты сечения воспламенения для углеводородных топлив изменяются в диапазоне $20 \leq x_1 \leq 40$. Поэтому при расчетах «приподнятых» факелов метана и пропана выбиралось два значения параметра $x_1 = 20$ и 40 . Параметр x_2 , характеризующий длину «области перехода», при $x_1 = 20$ выбирался равным 25, при $x_1 = 40$ $41 \leq x_2 \leq 50$. Оказалось, что при одновременном уменьшении $X = x_2 - x_1$ ($1 \leq X \leq 10$) и шага интегрирования Δx результаты расчета не зависят от X . Результаты расчета факелов метана показали (рис. 1—3), что при изменении X от 10 до 1 имеется сходимость к данным, полученным при $X = 1$. Аналогичные результаты имеют место и для «приподнятого» факела пропана.

Предложенная модель позволила качественно описать некоторые характерные особенности течения — увеличение в окрестности сечения воспламенения ширины «приподнятого» факела, резкий рост в этой области полноты сгорания, а также монотонное стремление за «областью перехода» ширины и полноты сгорания в «приподнятом» факеле к значениям этих параметров в присоединенном факеле.

Результаты расчета изменения осевой концентрации z_m по длине факела показали (рис. 1: 1 — присоединенный факел; «приподнятый» факел: 2 — $x_1 = 20$, $X = 5$, 3 — $x_1 = 40$, $X = 2$, 4 — $x_1 = 40$, $X = 1$; 5 — негорячая струя), что в соответствии с экспериментальными данными для горения городского газа [9] за сечением воспламенения происходит переход с зависимости для струй без горения на зависимость в присоединенном факеле (см. рис. 1, 2). Начиная со 150 калибров различие между этими зависимостями не превосходит 5%.

При вычислении коэффициента полноты сгорания η использовалась зависимость $\eta = \int_0^1 \rho_r u y dy / \int_0^1 \rho z u y dy$, где u — продольная компонента средней скорости, ρ_r — средняя концентрация горючего, z — средняя концентрация пассивной примеси, y — поперечная координата, все параметры течения обезразмеривались по параметрам на срезе сопла в начальном сечении.

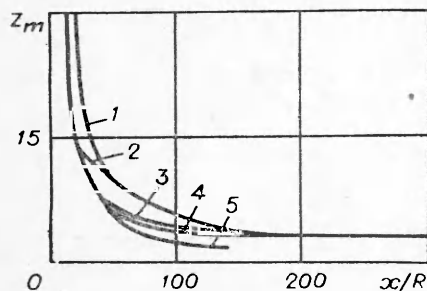


Рис. 1.

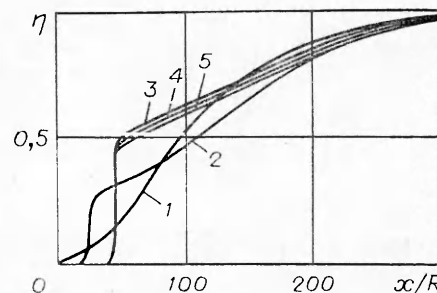


Рис. 2.

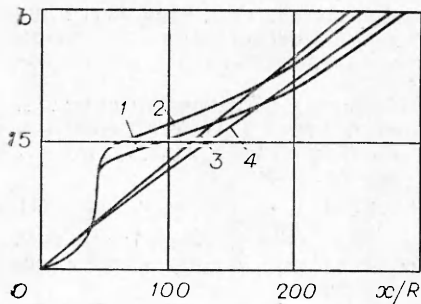


Рис. 3.

точке, где $z=0,5z_m$) по длине, показали (рис. 3, 1, 3 — присоединенный и «приподнятый» факел метана; 2, 4 — присоединенный и «приподнятый» факел пропана), что и для этого параметра течения основное различие для «приподнятых» и присоединенных факелов наблюдается на расстояниях, не превышающих 150—200 калибров. Оказалось, что в «области перехода» ширина «приподнятого» факела возрастает в 2—3 раза, что существенно больше, чем в присоединенном факеле на том же расстоянии. Эта особенность течения отмечается в большинстве экспериментальных исследований «приподнятых» факелов (например, [5, 10]). В [9], однако, указывается, что увеличение ширины факела за сечением воспламенения происходит менее интенсивно, чем в [5, 10].

Оказалось, что в сечении, соответствующем концу «области перехода» ($x_1=x_2$) в «приподнятом» факеле, поведение гидродинамических параметров течения существенно отличается в негорящей струе, «приподнятом» и присоединенном факелах. Например, для присоединенного факела профиль поперечной скорости v имеет два экстремума (в «приподнятом» факеле один ярко выраженный экстремум), причем абсолютное значение максимума в «приподнятом» факеле существенно меньше, чем в присоединенном.

Таким образом, расчетное исследование «приподнятых» факелов горения пропана и метана показало, что предложенная упрощенная модель «приподнятого» факела позволяет получать результаты, не противоречащие известным опытным данным, и описывать характерные особенности течения.

Поступила в редакцию 3/Х 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович. ЖТФ, 1949, XIX, 10, 1199.
2. В. Р. Кузнецов, А. Б. Лебедев и др. Изв. АН СССР, МЖГ, 1977, 1, 30.
3. В. Р. Кузнецов, А. Б. Лебедев и др. — В сб.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение гетерогенных и газовых систем. Черногоровка, 1977.
4. А. Б. Лебедев. Изв. АН СССР, МЖГ, 1978, 5, 46.
5. В. К. Баев, В. А. Ясаков. Изв. СО АН СССР. Серия техн. наук, 1969, 1, 3, 38.
6. В. К. Баев, В. А. Ясаков. ФГВ, 1975, 11, 2, 16.
7. L. Vanquickenborne, A. Van Tiggelen. Comb. Flame, 1966, 10, 1, 59.
8. Ю. М. Аннушкин, Е. Д. Свердлов. ФГВ, 1978, 14, 5, 53.
9. I. Ebrahimi, R. Kleine. 16-th Simp. (International) on Comb. The Combustion Institute, 1976.
10. Ю. М. Аннушкин, Е. Д. Свердлов. Тр. ЦИАМ, № 834, 1979.

УДК 662.611

ЯЧЕЙСТАЯ СТРУКТУРА ПЛАМЕНИ И ТУРБУЛЕНТНОЕ ГОРЕНИЕ

В. П. Карпов
(Москва)

Из-за сложности процессов, происходящих в турбулентном пламени, в настоящее время нет удовлетворительного объяснения многих сторон этого явления. Знания о взаимодействии пламени с возмущениями среды, вызываемыми различными источниками, также недостаточны для аналитического подхода к решению проблемы. По этой причине необходимы экспериментальные наблюдения, позволяющие выявить влияние параметров и наметить пути выяснения механизма горения. Резуль-