

ДИФФУЗИОННОЕ ГОРЕНИЕ ГАЗОВЫХ СТРУЙ В ЛАМИНАРНОМ И ТУРБУЛЕНТНОМ РЕЖИМАХ

АННОТАЦИЯ

Рассмотрена газодинамика диффузионного горения при истечении струй горючих газов в свободное пространство окислителя (воздуха). С привлечением теории и практики теплообмена осуществлено обобщение экспериментальных данных о высотах факела ламинарных и турбулентных струй от чисел Рейнольдса Re и, дополнительно, от размеров сопел d_0 в виде $L/d_0 = A Re^n (d_*/d_0)^{0,5}$.

1. ВВЕДЕНИЕ

Горение начинается с межмолекулярной экзотермической реакции, но управляют его поддержанием и развитием физические процессы, протекающие на макроуровне. В представляющих наибольший практический интерес стабильных, чаще всего высокотемпературных пламенах важно не только само выделение теплоты, но и обеспечение стабильности горения, рациональное использование тепловой энергии, регулирование интенсивности тепловыделения. И здесь ведущая роль принадлежит методам теплофизики, точнее организации процессов теплопереноса, достаточно хорошо отработанной применительно к теплотехническим аппаратам и технологиям.

Главным преимуществом использования предварительно перемешанных смесей является возможность лучшего управления процессом горения. Перемешанная до молекулярного уровня смесь горючего газа с окислителем обеспечивает практически постоянную скорость горения, нужную температуру, заданный химический состав, что весьма важно в теплотехнической практике и при решении экологических задач, в частности, для сокращения выбросов оксидов азота, бензапирена, сажи.

2. ДИФФУЗИОННОЕ ГОРЕНИЕ

Однако приготовление, и тем более хранение предварительно перемешанных смесей чревато опасностью встречного проскока пламени в объем, занятый такой смесью, ее воспламенением, взрывом. Поэтому на практике более широкое распространение получило горение предварительно не смешанных смесей, так называемое диффузионное. Такое название оно получило потому, что лимитирующим процессом, определяющим скорость горения топлива, является диффузия (в более общем случае, теплообмен), обеспечивающая взаимный перенос горючего и окислителя и получение концентрации смеси, при которой происходит ее воспламенение и горение. Если при горении пред-

варительно перемешанных смесей фронт (или волна) пламени четко отделяет свежую смесь от продуктов сгорания, то при диффузионном горении фронт сильно «размыт». Схематично такой фронт ламинарного диффузионного пламени для случая горения водорода в воздухе представлен на рис. 1. На нем видно, как в сечении AA концентрация горючего C_{H_2} падает от центра пламени к периферии (от 1 до нуля), а концентрация атмосферного кислорода C_{O_2} навстречу с периферии (от 21% об.) к центру. Там, где концентрации смеси достигают предельных для горения бедных (справа) и богатых (слева) смесей возникает пламя, наиболее горячее и яркое оно имеет место в центре горящего слоя. Поэтому в диффузионном факеле присутствует широкий спектр концентраций взаимодействующих и получающихся в процессе горения веществ и температур, т.е. всегда есть зоны, где, скажем, образуются вредные вещества (NO_x , сажа, бензапирен и т.п.).

Особенностью турбулентных пламен является частое протекание термохимических превращений горючего еще до начала горения, в процессе подогрева.

Особое место занимают пламена с предварительным подмешиванием к горючему некоторого количества окислителя (в терминологии огневой теплотехники, первичного воздуха). Получающаяся «богатая» смесь после «внутреннего» сгорания переходит к догоранию в диффузионном режиме за

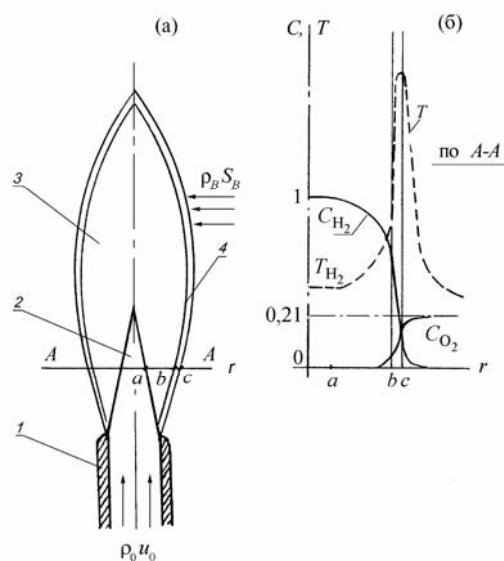


Рис. 1. Схемы водородно-воздушного ламинарного диффузионного факела (а) и полей температуры T и концентраций водорода C_{H_2} и кислорода C_{O_2} (б) во фронте горения и его окрестностях

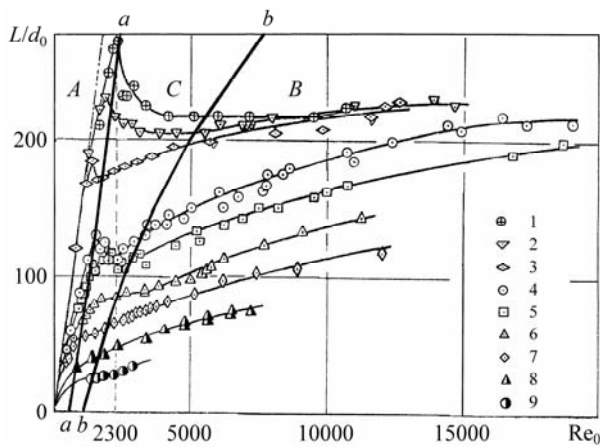


Рис. 2. Зависимость безразмерной высоты L/d_0 водородного пламени от числа Re_0 и диаметра горелок [1]: 1 – $d_0 = 1,45$ мм; 2 – 1,9; 3 – 2,9; 4 – 4,0; 5 – 6,0; 6 – 10,75; 7 – 15,5; 8 – 21,0; 9 – 51,7

счет смешения с атмосферным воздухом. Такое двухступенчатое сжигание топлив позволяет сокращать генерацию указанных выше вредных веществ и выброс их в атмосферу.

В отличие от пламен предварительно перемешанной смеси в диффузионных пламенах фронт пламени не распространяется самопроизвольно в сторону свежей смеси, а поэтому их нельзя характеризовать стандартной скоростью горения S_B^0 . В этом случае такой характерной величиной является высота (длина) факела L .

Представление экспериментальных данных в виде зависимости относительной высоты факела L/d_0 от числа Рейнольдса истекающей струи $Re_0 = (\rho_0 u_0 d_0) / \eta$ (рис. 2) позволило разграничить области ламинарного (A) и турбулентного (B) пламени. Главной отличительной особенностью ламинарной области является существенная зависимость высоты пламени от скорости истечения водорода (или числа Рейнольдса). При переходе от ламинарного течения к турбулентному в переходной области имеет место либо резкое снижение высоты пламени, либо перелом зависимости $(L/d_0) = f(Re_0)$ с уменьшением угла наклона. Все это позволяет довольно четко очертить правую (по Re_0) границу области A ламинарного пламени линией a–a и левую границу области B турбулентного пламени – b–b. Интересно, что в отличие от течения газов в трубах

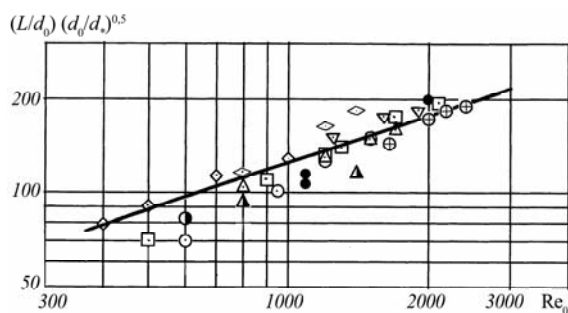


Рис. 3. Зависимость относительной высоты пламени от числа Re_0 в ламинарном режиме горения (обозначение значков соответствует рис. 2)

граница ламинарной области $Re_{tr,1}$ оказалась зависимой от размера горелки d_0 : чем больше d_0 , тем ниже числа $Re_{tr,1}$, при которых начинается переход от ламинарного режима к турбулентному. Так, для горелок с малым размером выходного патрубка $d_0 = 1,47$ мм такой переход затягивался до $Re_{tr,1} = 2300$, тогда как при $d_0 = 51,4$ мм величина $Re_{tr,1}$ уменьшалась до 700. В области B хорошо видна зависимость относительной длины факела L/d_0 от диаметра, пропорциональная $d_0^{-0,5}$, однако при $d_0 \leq 2,9$ мм влияние геометрического масштаба практически не проявляется.

Это обстоятельство дало возможность провести обработку приведенных на рис. 2 экспериментальных данных в виде единой зависимости:

$$(L/d_0)(d_0/d_*)^{0,5} = f(Re_0), d_0 > d_*, \quad (1)$$

где в качестве d_* принимается диаметр горелки, равный 0,003 м, и получить обобщающие расчетные формулы.

3. ЛАМИНАРНЫЕ ПЛАМЕНА

В результате для ламинарного режима горения водорода в воздухе была получена единая формула:

$$L/d_0 = 3,95 Re_0^{0,5} (d_0/d_*)^{-0,5}, \quad (2)$$

которая при $d_* = idem$ упрощается до

$$L/d_0 = 3,95 Re_*^{0,5}, \quad (3)$$

где $Re_* = (U_0 d_*) / \nu$.

Разброс точек (рис. 3) не превысил $\pm 20\%$, т.е. согласие формулы (2) с экспериментом можно считать вполне удовлетворительным.

Аналогичным образом было проведено обобщение заимствованных из литературы экспериментальных данных по ламинарному диффузионному горению в воздухе еще трех газов – городского газа и CO (рис. 4) [3] и генераторного газа (рис. 5) [4] – и были получены следующие формулы:

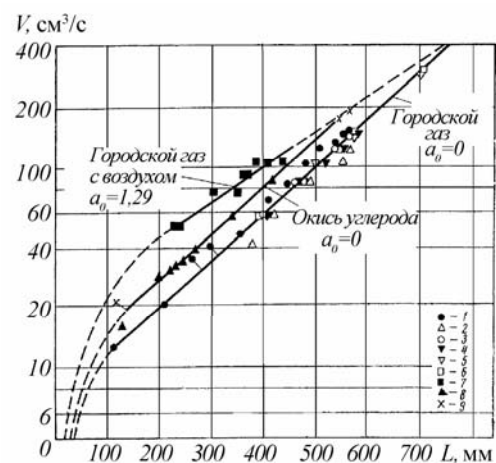


Рис. 4. Зависимости длины ламинарного диффузионного факела L от объемного расхода V горючего газа через сопло

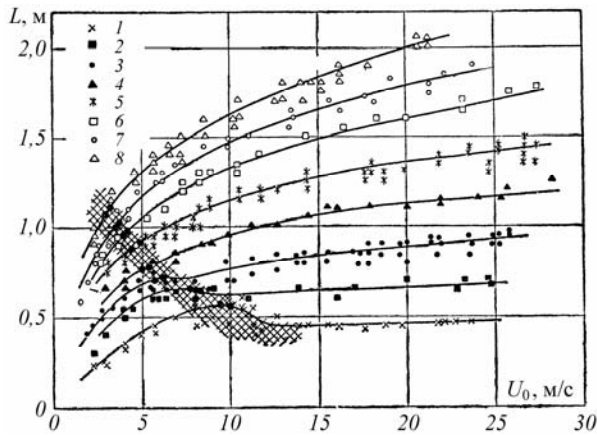


Рис. 5. Зависимости длины горящего диффузионного факела L от скорости вертикального истечения генераторного газа U_0 из сопла [4]:
 1 – $d_0 = 10,1$ мм; 2 – 15,2; 3 – 20,3; 4 – 25,1; 5 – 30,2; 6 – 35,3; 7 – 40,2; 8 – 45,3

для городского (детройтского) газа

$$L/d_0 = 3,60 \text{Re}_0^{0,5} (d_0/d_*)^{-0,5}, \quad (4)$$

для СО

$$L/d_0 = 2,70 \text{Re}_0^{0,5} (d_0/d_*)^{-0,5}, \quad (5)$$

для генераторного газа

$$L/d_0 = 1,03 \text{Re}_0^{0,5} (d_0/d_*)^{-0,5}. \quad (6)$$

Сопоставление их с соответствующим экспериментом, приведенное на рис. 6, показало удовлетворительное соответствие.

Из сравнения этих трех формул между собой и с формулой (2) для водорода следует, что они различаются лишь постоянным коэффициентом. Этого и

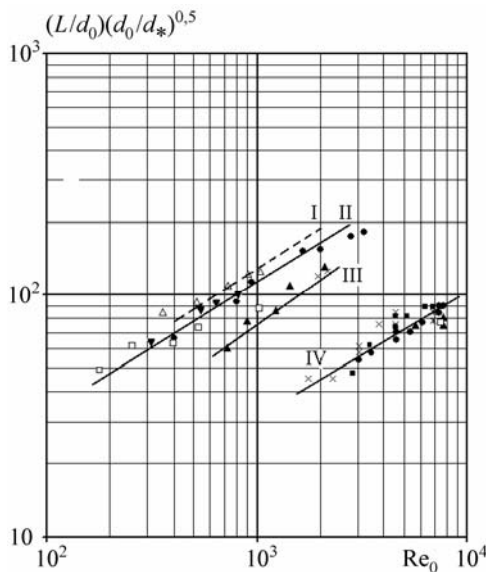


Рис. 6. Обобщение данных по L/d_0 для диффузионного ламинарного факела горящих газов: водорода (I), городского газа (II), СО (III) и генераторного газа (IV). Обозначения точек см. на рис. 4 и 5

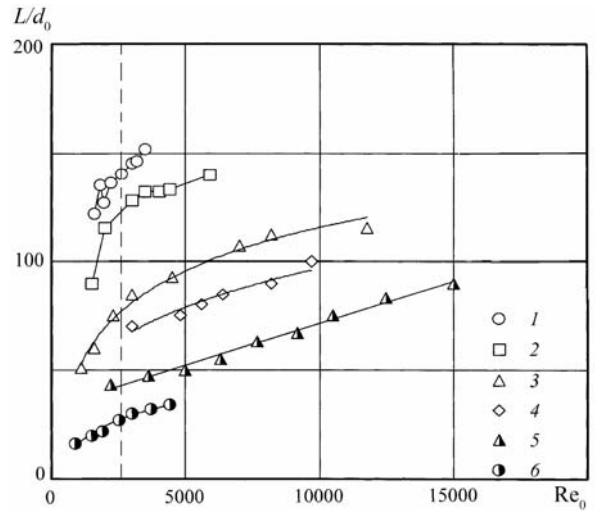


Рис. 7. Зависимости безразмерной высоты пламени L/d_0 метана от числа Рейнольдса и диаметра d_0 при турбулентном горении метана [5]:
 1 – $d_0 = 4$ мм; 2 – 6,0; 3 – 12,75; 4 – 15,5; 5 – 21,0; 6 – 52,0

можно было ожидать, поскольку безразмерные критерии правой части формул включают размеры и свойства (вязкость, плотность) исходных смесей при начальной температуре, близкой к комнатной. Теплоты сгорания, а с ними и температуры горения исследованных топливных смесей различны и их влияния на скорость ламинарного диффузионного горения и на размеры факелов следовало ожидать.

4. ТУРБУЛЕНТНЫЕ ПЛАМЕНА

Наиболее полные исследования турбулентных пламен при диффузионном горении газов выполнены в отечественных работах [1], [4] и [5]. Исходные для дальнейшего анализа экспериментальные данные приведены на рис. 2, 5 и 7 соответственно. Указанных на них для каждой точки значений L/d_0 , d_0 и Re_0 достаточно для представления их в обобщенной форме типа $L/d_0 = f(\text{Re}_0, d_0/d_*)$, аналогичной использованной для обобщения данных по ламинарному горению газов. Результаты такого обобщения приведены на рис. 8. Как следует из рассмотрения этого рисунка разброс точек вдоль линий, отвечающих турбулентному диффузионному горению в воздухе

водорода

$$L/d_0 = 13,9 \text{Re}_0^{0,3} (d_0/d_*)^{-0,5}, \quad (7)$$

метана

$$L/d_0 = 12,6 \text{Re}_0^{0,3} (d_0/d_*)^{-0,5}, \quad (8)$$

генераторного газа

$$L/d_0 = 5,8 \text{Re}_0^{0,3} (d_0/d_*)^{-0,5}, \quad (9)$$

в основном не превышает $\pm 20\%$, обычных для настоящей статьи. Однако, как и в случае ламинарного диффузионного горения газовых струй, при турбулентном их горении наблюдается различие в постоянных коэффициентах, и опять наибольший ко-

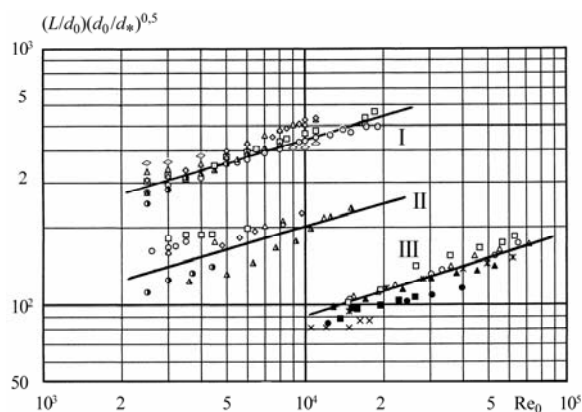


Рис. 8. Обобщение данных по L/d_0 для диффузионного турбулентного факела горящих газов: водорода (I), метана (II) и генераторного газа (III). Обозначения точек см на рис 2, 5 и 7

эффицент (13,9) отвечает горению водорода, а наименьший (5,8) – горению генераторного газа. Правда, различие стало меньше: для ламинарного пламени оно составляло 3,8 раза, для турбулентного – 2,4.

Если за причину таких расхождений принять вышеприведенную версию: сказываются условия в высокотемпературной области, то представляется логичным ослабление этой зависимости в турбулентном режиме горения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Применительно к горению струй горючего газа, истекающих в объем окислителя, показаны два основных режима: ламинарный и турбулентный, а также промежуточный, с увеличивающейся с ростом L/d_0 с шириной по Re .

2. С привлечением теории и практики теплообмена было проведено обобщение эксперимен-

тальных данных для различных горючих газов и получены расчетные формулы:

– для высоты факела L при ламинарном диффузионном горении газов;

– для высоты факела L при турбулентном диффузионном горении газов.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

d_0 – диаметр сопла, м;

d_* – характерный диаметр, м;

S_B^0 – нормальная скорость распространения пламени, м/с;

U – скорость истечения газа из сопла, м/с;

Re – число Рейнольдса;

Δ – разность.

Индексы:

B – горение;

0 – начальная.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпов В.Л., Мостинский И.Л., Полежаев Ю.В. Ламинарный и турбулентный режимы горения водородных затопленных струй. // ТВТ. 2005. Т. 43. №1. С. 115–120.
2. Полежаев Ю.В., Мостинский И.Л., Горяинов Д.А. Диффузионный режим горения. // Законы горения. Под общ. ред. Ю.В. Полежаева. М.: Энергомаш, 2006. С. 43–61.
3. Hottel Н.С., Howthorne W.R. III Symposium on Combustion and Flame and Explosion Phenomena. Baltimore, 1949. P. 284.
4. Левченко П.В. Исследование горящих факелов генераторного и коксовального газов // Теплообмен и вопросы экономики топлива в металлургических печах. М.: Металлургиздат, 1951. С. 73–97.
5. Шевяков Г.Г. Экспериментальное исследование размеров и пределов устойчивости турбулентных диффузионных пламен водорода и метана: Дис. ... канд. техн. наук. М.: МИХМ, 1974. 168 с.