

## ЛИТЕРАТУРА

1. В. Г. Воронков, Н. Н. Семенов. ЖФХ, 1939, XIII, 12, 1695.
2. Б. В. Новожилов, В. С. Посвянский. ФГВ, 1973, 9, 2, 225.
3. Я. Б. Зельдович, Д. А. Франк-Каменецкий. Докл. АН СССР, 1938, XIX, 9, 693.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОРМАЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ И КРИТИЧЕСКИХ ДИАМЕТРОВ ГАШЕНИЯ ПЛАМЕНИ АММИАЧНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

*В. Ф. Заказнов, Л. А. Куршева, З. И. Федина*

*(Москва)*

Известно, что аммиачно-воздушные смеси горят медленно. Этим объясняется тот факт, что в стандартных условиях в атмосфере воздуха невозможно стационарное диффузионное горение аммиака, а также стационарное горение аммиачно-воздушной смеси без постоянного источника поджигания. Кроме того, при поджигании названной смеси у открытого конца трубы пламя сверху вниз не распространяется. Известно также, что при поджигании сверху у открытого конца трубы пламя начинает распространяться вниз по нагретой до 353 К смеси, содержащей 22—23% аммиака (здесь и далее указана объемная концентрация) [1].

Ранее при атмосферном давлении и температуре 423 К двумя методами определена максимальная величина нормальной скорости пламени ( $u_{n\max}$ ) аммиачно-воздушной смеси. При определении методом бунзеновской горелки (при  $T=423$  К возможно стационарное горение смеси на срезе горелки) величина  $u_{n\max}=0,23$  м/с [2] при содержании аммиака в смеси 20%. Определенная при той же температуре методом плоскопламенной горелки величина  $u_{n\max}$ , соответствующая 22,5%-ному содержанию аммиака в смеси, оказалась равной 0,15 м/с [2]. Таким образом, значения  $u_{n\max}$ , определенные при  $T=423$  К разными методами, существенно отличаются друг от друга.

В работе [3] при определении условий поджигания и распространения пламени аммиачно-воздушной смеси в стеклянной трубке диаметром 15 мм в условиях свободного истечения продуктов сгорания в атмосферу при  $T=293$  К ориентировочно определена величина  $u_n$  смеси, содержащей 22% аммиака. Смесь в трубке двигалась сверху вниз, фронт пламени перемещался снизу вверх. Практически плоский фронт пламени оставался в трубке неподвижным при скорости потока смеси 0,06 м/с. Эта величина, по-видимому, несколько занижена, так как в трубке диаметром 15 мм на скорость горения оказывают заметное влияние тепловые потери в стенки трубки.

На основе предположения о решающей роли конвекции при затухании пламени на бунзеновской горелке в околопредельных смесях в результате подмешивания холодного газа окружающей атмосферы к продуктам сгорания на краю горелки вычислено значение предельной нормальной скорости, равное 0,066 м/с [4], при котором еще возможно устойчивое горение. Целесообразно было определить величину  $u_n$  аммиачно-воздушных смесей при  $T=293$  К и  $p=1$  атм в широком диапазоне содержания аммиака в смеси.

При распространении пламени аммиачно-воздушной смеси (содержащей 22% аммиака) сверху вниз в вертикально расположенной трубе, верхний конец которой был прикрыт сеткой, критический диаметр гашения пламени  $\delta_{кр}$  определен в 22,1 мм [5]. В работе [6] в подобных условиях изучено гашение пламени этой смеси в вертикально расположенных трубках диаметром 50 мм. Пламя начинало распространяться вниз, если вверху трубы создавалось сопротивление выходящей горючей смеси и нагретым продуктам сгорания. Так, например, если верхняя труба прикрыта кольцевой пластиной с отверстием 40 мм, то  $\delta_{кр} = 18$  мм. Если верхний конец трубы прикрыт пластинкой с отверстием диаметром 15 мм, то величина  $\delta_{кр}$  снижается до 12 мм [6].

Приведенные данные [3, 6] показывают, что определенная в опытах [5] величина  $\delta_{кр} = 22,1$  мм справедлива только для описанных условий и не является минимальной для аммиачно-воздушной смеси при  $T = 293$  К и  $p = 1$  атм. Целесообразно также определять величины  $\delta_{кр}$  для всего диапазона составов аммиачно-воздушных смесей.

Применяемые обычно для измерения величины  $u_n$  методы (бунзеновская горелка, бомбы постоянного давления и объема) в данном случае оказались непригодными, так как на бунзеновской горелке невозможно было получить стационарное пламя. В бомбах постоянного давления и объема также невозможно получить сферический фронт пламени вследствие преимущественного влияния конвективного подъема нагретых продуктов сгорания на фронт пламени.

В настоящей работе определялась нормальная скорость пламени аммиачно-воздушных смесей известным методом цилиндрической трубы. Опыты проводились в вертикально расположенной стеклянной трубе с внутренним диаметром 54 и длиной 1300 мм. Через верхний закрытый конец трубы продувалась горючая смесь, которая поджигалась искрой от индукционной катушки у нижнего открытого конца трубы. Вскоре после поджигания пламя приобретало вытянутую куполообразную форму и практически без изменения величины поверхности фронта пламени равномерно перемещалось вверх по трубе. Измеряя время перемещения и фотографируя фронт пламени, можно определить нормальную скорость пламени по формуле

$$u_n = u_b \cdot \pi \cdot D_{пл}^2 / 4S_{пл},$$

где  $u_b$  — видимая скорость пламени;  $D_{пл}$  — максимальный диаметр сечения поверхности параболоидного фронта пламени;  $S_{пл}$  — площадь поверхности фронта пламени. При концентрации аммиака в смеси 20—25% величина  $D_{пл}$  практически не отличается от внутреннего диаметра трубы. В более богатых и особенно в более бедных смесях  $D_{пл}$  была заметно меньше диаметра трубы.

Как и в работе [7], где методом трубы определялись величины  $u_b$  и  $u_n$  для околопредельных смесей пропана, бромистого водорода и воздуха, в настоящих опытах пламена со сравнительно большой величиной  $u_b$ , равной 0,25—0,3 м/с, были почти полусферические, более медленные, сравнительно удлиненные. Площадь поверхности фронта пламени находилась как сумма площадей поверхности полусферы и боковой поверхности круглого или усеченного цилиндра с небольшой конусностью. Границы фронта пламени на фотографиях хорошо различимы. Результаты опытов приведены на рис. 1. Максимальную величину  $u_n = 0,07$  м/с имеет смесь, содержащая 23% аммиака. Это примерно в 5 раз меньше величины  $u_{n\max} = 0,35—0,40$  м/с для большинства углеводородов в смеси с воздухом. Ближе к нижнему пределу (17—17,5% аммиака)  $u_n \approx 0,03$  м/с. Полученное  $u_n = 0,067$  м/с для смеси, содержащей 22% аммиака, удовлетворительно совпадает с приблизительно определенной величиной  $u_n = 0,06$  м/с [3].

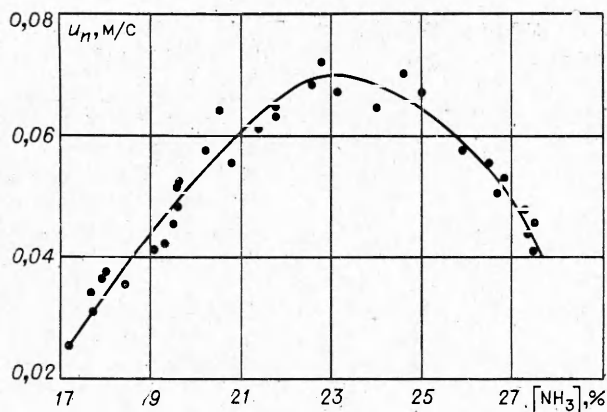


Рис. 1. Значения нормальных скоростей пламени в зависимости от содержания аммиака в воздухе.

Ранее при изучении пределов воспламенения в кубической камере с ребром 2 м измерены величины  $u_b$  аммиачно-воздушных смесей, содержащих 18—28% аммиака [8]. В одной из боковых стенок камеры на расстоянии 1,55 м от потолка имелось отверстие диаметром 0,5 м, закрытое тонкой лавсановой пленкой, которая перед поджиганием надрезалась. Смесь поджигалась на расстоянии 200 мм от потолка. Пламя поднималось вверх, растекалось по потолку и затем под действием расширяющихся нагретых продуктов сгорания начинало распространяться вниз. Фронт пламени представлял собой почти плоскую турбулизованную зону горения толщиной  $\approx 100$  мм с загнутыми вниз краями. Пламя всех исследованных смесей двигалось вниз с замедлением. Распространение пламени с примерно постоянной скоростью  $u_b$  происходило лишь на начальном участке. Несмотря на существенные отличия в методике эксперимента, вычисленные значения  $u_n$  [8] удовлетворительно согласуются с полученными опытными данными.

На бунзеновской горелке диаметром 14 мм с фотографированием конуса пламени на теновом приборе определена минимальная величина  $u_n = 0,10$  м/с для смеси аммиак — кислород — азот, в которой было 45,5% аммиака, а отношение кислорода к сумме кислорода с азотом равно 0,35. Таким образом, значение минимальной величины  $u_n$ , при которой пламя смеси может стационарно гореть на бунзеновской горелке или распространяться вниз, лежит в пределах 0,07—0,10 м/с, что удовлетворительно согласуется с соответствующей величиной  $u_n$ , вычисленной в работе [4].

Критические диаметры гашения пламени аммиачно-воздушных смесей определялись в вертикально расположенных стеклянных трубках, присоединяемых сверху к трубе диаметром 95 мм, у нижнего открытого конца которой проводилось поджигание смеси искрой от индукционной катушки. Верхний конец труб малого диаметра перед поджиганием закрывался. Методика эксперимента описана в [6]. Результаты опытов приведены на рис. 2.

Минимальную величину  $\delta_{кр} = 12$  мм имеет смесь, содержащая 22,5% аммиака. Это примерно в 4 раза больше  $\delta_{кр\min} = 2,5—3,0$  мм для большинства углеводородов в смеси с воздухом. Вблизи концентрационных пределов  $\delta_{кр} = 25$  мм. Средняя величина критерия Пекле на пределе гашения пламени ( $Pe_{кр}$ ) с учетом определенных величин  $u_n$  и  $\delta_{кр}$  во всем диапазоне концентраций аммиака равна 37 и удовлетворительно согласуется с ранее полученной величиной  $Pe_{кр}$  для смесей аммиак — кислород — азот [9], а также для многих других горючих газов и паров в смеси с различными окислителями [10].

В работе также определена величина  $\delta_{кр\min}$  для аммиачно-воздушной смеси, содержащей 22,5% аммиака, в условиях полузамкнутого объема. Опыты проводились в расположенном вертикально герметичном цилиндрическом сосуде с внутренним диаметром 50 мм, высота реакционного объема составляла 320 мм. Внутренний объем сосуда

разделялся на две камеры диском с вертикальным пламегасящим каналом (трубкой) высотой 80 мм. Смесь поджигалась в центре нижней камеры высотой 40 мм. Объем верхней камеры был примерно в 7 раз больше объема нижней. После поджигания пламя проскакивало из нижней камеры в верхнюю через трубки с внутренним диаметром 15; 12; 11; 10; 9; 8 мм. Для трубки с диаметром отверстия 7 мм не произошло ни одного проскока пламени в нескольких десятках опытов. Таким образом, при  $p=1$  атм и  $T=293$  К в условиях полузамкнутого объема (камера поджигания соединяется с остальным объемом сосуда единичным каналом) величина  $\delta_{кр\min}$  аммиачно-воздушной смеси оказалась равной 7,5 мм, что в 1,6 раза меньше по сравнению с  $\delta_{кр\min}$  аммиачно-воздушной смеси в условиях свободного истечения продуктов сгорания в атмосферу.

Максимальное давление взрыва аммиачно-воздушной смеси составляет  $6 \cdot 10^5$  Па [11]. Объем нижней камеры выбирался сравнительно небольшим для того, чтобы в значительной степени уменьшить известное явление поджатия горючей смеси перед подходом пламени к огнепреграждающим каналам [12, 13]. После поджигания горючей смеси в случае гашения пламени давление в сосуде может увеличиться почти в 2 раза в результате перетекания горючей смеси и продуктов сгорания через пламегасящий канал из нижней камеры в верхнюю. Однако неполное сгорание горючей смеси в нижней камере (часть несгоревшей смеси успевает перетечь в верхнюю камеру через трубу сравнительно большого диаметра, пламя распространяется не на весь объем нижней камеры), а также охлаждающее влияние стенок при сравнительно малых величинах диаметра и высоты камеры поджигания приводит лишь к полуторакратному росту давления в сосуде.

Известно, что величина  $\delta_{кр}$  примерно обратно пропорциональна давлению смеси. При пересчете на атмосферное давление величины  $\delta_{кр}=7,5$  мм, определенной практически при  $p \approx 1,5 \cdot 10^5$  Па, получается значение, равное  $\delta_{кр}$ , определенному при атмосферном давлении в условиях свободного истечения продуктов сгорания в атмосферу.

Следует отметить, что в опытах с трубкой диаметром 7 мм (диаметр несколько меньше критического) при поджигании в нижней камере пламя под действием давления расширяющихся продуктов сгорания проходило через трубку и выскакивало из нее в верхнюю камеру узким факелом длиной 25—30 мм. Однако смесь в верхней камере не поджигалась, по-видимому, вследствие сравнительно высокой скорости движения пламени относительно горючей смеси и малого времени существования факела. Известно, что при увеличении скорости потока аммиачно-воздушной смеси свыше 8 м/с, она не поджигается даже при довольно мощном источнике поджигания [3]. Аналогичное явление наблюдалось и ранее [6].

При  $p=1$  атм и  $T=293$  К определена минимальная величина критического гасящего щелевого зазора  $\delta_{кр\щ}$  аммиачно-воздушной смеси, содержащей 22,5% аммиака. В вертикальной цилиндрической трубе

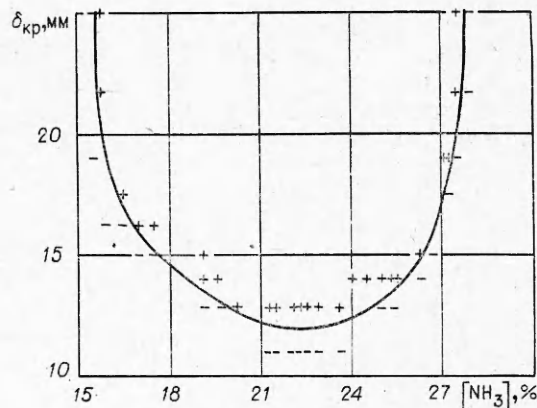


Рис. 2. Значения критического диаметра гашения пламени в зависимости от содержания аммиака в воздухе.

диаметром 100 мм размещались на определенном фиксированном расстоянии друг от друга квадратные пластины из оргстекла со стороной 80 мм. Минимальная длина щелевого канала равнялась половине стороны пластины, т. е. 40 мм. В центре пластин сверлились отверстия диаметром 0,5 мм для поджигающих элементов, концы которых располагались в плоскости внутренних поверхностей пластин. После продувки трубы горючей смесью и остановки потока смесь поджигалась.

При ширине щели 6,5 мм образующееся в результате поджигания пламя не выходит за пределы квадрата щели, распространяясь во все стороны на 20—30 мм. При ширине щели 7,5 мм пламя распространялось по щелевому каналу и поджигало смесь во всем объеме трубы. Таким образом, минимальная величина  $\delta_{кр,аммиачно-воздушная}$  смеси при  $p=1$  атм и  $T=293$  К оказалась равной 7 мм. С учетом пересчета щелевого канала на цилиндрический ( $\delta_{кр} = 1,4\delta_{крщ}$  [14]) величина  $\delta_{крщ} = 7$  мм удовлетворительно согласуется с приведенными выше опытными данными.

Поступила в редакцию  
28/II 1978

#### ЛИТЕРАТУРА

1. H. F. Coward, G. W. Jones. US Bureau of Mines, 1952, Bull., 503.
2. L. Cohen. Fuel, 1955, 34, 123.
3. В. Ф. Заказнов, Л. А. Куршева и др. Труды ГИАП, вып. 36, 1975, с. 43.
4. В. С. Бабкин. ФГВ, 1973, 9, 5, 758.
5. J. R. Grove. Third Symposium on Chemical Process Hazards with Special Reference to Plant, Design. London, 1967, p. 51.
6. В. Ф. Заказнов, Л. А. Куршева и др. ФГВ, 1975, 11, 2, 247.
7. R. F. Simmons, N. Wright. Combustion and Flame, 1972, 18, 2, 203.
8. В. Н. Кривулин. ФГВ, 1975, 11, 6, 890.
9. В. Ф. Заказнов, Л. А. Куршева и др. ФГВ, 1976, 12, 1, 132.
10. В. Ф. Заказнов, А. И. Розловский, И. И. Стрижевский. Инж. ж., 1963, 3, 2, 280.
11. Пожарная опасность веществ и материалов, применяемых в химической промышленности. Справочник. Под ред. И. В. Рябова. М., «Химия», 1970.
12. С. М. Когарко, А. Г. Лямин, В. А. Михайлов. Хим. пром-сть, 1965, № 8, с. 621.
13. В. Ф. Заказнов, А. И. Розловский, И. И. Стрижевский. ЖФХ, 1968, 42, 10, 2638.
14. A. Thomas. VI-th Symposium on Combustion. New York. 1957, p. 701.

### ОБ ЭФФЕКТЕ СИНЕРГИЗМА В ПРОЦЕССАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ

В. А. Бунев, В. С. Бабкин

(Новосибирск)

Известно, что добавление двух или нескольких ингибиторов в смесь горючего газа с окислителем может привести к непропорциональному увеличению эффективности ингибирования процесса горения, называемому синергизмом. Это явление широко используется для поиска эффективных огнегасящих составов. Однако предлагаемые в литературе [1—3] критерии оценки этого эффекта недостаточно корректны и в ряде случаев приводят к неточным выводам относительно степени влияния ингибиторов друг на друга.