

9. A. A. Westenberg, N. de Haas. J. Phys. Chem., 1972, 76, 2215.
10. T. A. Brabbs, F. E. Bells. 11-th Symp. (Int.) on Combustion, Comb. Inst., Pittsburgh, 1967, p. 125.
11. N. R. Greiner. J. Phys. Chem., 1968, 72, 406.
12. E. A. Albers, K. Hoeuerman a. o. 13-th Symp. (Int.) on Combustion, Comb. Inst., Pittsburgh, 1971, p. 81.
13. В. Я. Басевич, С. М. Когарко, Г. А. Фурман. Изв. АН СССР, сер. химич., 1972, 2371; 1974, 197.
14. J. Peeters, G. Mahnen. 14-th Symp. (Int.) on Combustion, Comb. Inst, Pittsburgh, 1973, p. 133.
15. C. P. Lazzara, J. C. Biordi, J. F. Parr. Comb. and Flame. 1973, 21, 371.

УДК 536.46.541.126

ГАШЕНИЕ ПЛАМЕНИ АММИАЧНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

В. Ф. Заказов, И. И. Стрижевский, Л. А. Куршева, З. И. Федина

(Москва)

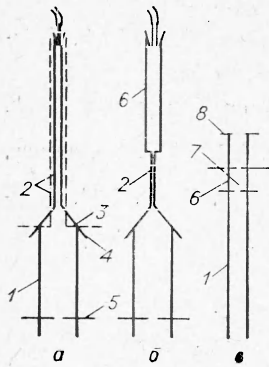
Аммиак находит очень широкое применение, но его взрывные свойства до настоящего времени изучены недостаточно. Это в первую очередь относится к критическому диаметру гашения пламени ($\delta_{кр}$) аммиачно-воздушной смеси.

Была определена критическая величина щелевого зазора ($\delta_{щкр}$) наиболее быстрогорящей аммиачно-воздушной смеси (22 об. % NH_3) в оболочке объемом 8 л, состоящей из двух полусфер, фланцы которых образуют щелевой зазор; $\delta_{щкр}$ оказалась равной 3,1 мм [1]. Известно, что в полузамкнутом объеме, соединенном с окружающим пространством узким кольцевым щелевым каналом, при сгорании смеси в результате поджатия возникает давление, в несколько раз превышающее начальное. Поэтому $\delta_{щкр}$, определенное в этих условиях, как правило, в несколько раз меньше соответствующей величины, полученной при отсутствии поджатия горючей смеси.

В работе [2] в вертикально расположенной трубке была определена величина $\delta_{кр} = 22,1$ аммиачно-воздушной смеси (22 об. % аммиака) при распространении пламени сверху вниз через отверстия в медной пластине толщиной 1,0 мм. В работах [3, 4] было показано, что при атмосферном давлении и комнатной температуре пламя аммиачно-воздушной смеси сверху вниз не распространяется.

В работе [2] для создания возможности распространения пламени сверху вниз применялась небольшая труба для разгона пламени. Смесь поджигалась на высоте 50 мм от отверстия пластины. В этой работе в аналогичных условиях (однако без применения дополнительной трубки) были также определены величины для 19 горючих газов и паров в смеси с воздухом; для этих же горючих смесей приведены значения $\delta_{щкр}$, определенные в полузамкнутой оболочке [1]. Отношение $\delta_{кр}/\delta_{щкр}$ для упомянутых горючих изменяется от 2,5 до 3,4 и в среднем равно 3,0. Лишь для аммиака $\delta_{кр}/\delta_{щкр} = 6,9$. Из этого можно сделать предположение, что определенная в описанных условиях для аммиачно-воздушной смеси величина $\delta_{кр} = 22,1$ мм не является минимальной.

Поэтому целесообразно было определить $\delta_{кр}$ для аммиачно-воздушной смеси при распространении пламени снизу вверх и в условиях отсутствия поджатия, т. е. при свободном истечении продуктов сгорания в атмосферу.



Почти все опыты были проведены с наиболее быстрогорящей аммиачно-воздушной смесью, содержащей 22 об. % аммиака. Горючие смеси готовили в смесителе высокого давления с электромагнитной мешалкой по парциальным давлениям компонентов. Содержание аммиака контролировали общепринятым методом поглощения аммиака серной кислотой и титрования избытка кислоты щелочью [5, 6].

Схема устройства для определения критического диаметра гашения пламени показана на рисунке (а). К расположенной вертикально стеклянной трубе 1 с внутренним диаметром 95 мм и высотой 300 мм присоединяли сменные стеклянные трубки 2

длиной 500—700 мм. Трубки диаметром более 20 мм (здесь и далее указан только внутренний диаметр трубок) присоединяли к трубе 1 с помощью плоского резинового кольца 3, а трубки диаметром менее 20 мм — с помощью резиновой воронки 4.

Горючую смесь подавали в устройство через пробку, вставленную в верхний конец трубки 2. Перед каждым опытом устройство продували горючей смесью. Продувку прекращали перекрытием потока горючей смеси и затем, не удаляя верхней пробки, через 2—3 с смесь поджигали искрой, создаваемой между электродами 5 с помощью высоковольтного индуктора. После поджигания смеси пламя куполообразной формы распространялось вверх по трубке 1 и затем по трубке 2 или гасло на входе или внутри ее. Распространение пламени в трубке 2 регистрировали визуально и фотографированием. В этих условиях во всех опытах пламя ниже электродов не распространялось. (Расстояние от электродов до нижнего среза трубы 1 равно 60 мм.)

Было установлено, что пламя хорошо распространяется по всей длине в трубках диаметром 40, 27, 21, 18, 15 мм и гаснет в трубке с внутренним диаметром 11 мм. Когда перед поджиганием пробку из трубки 2 удалили, пламя прошло через трубки диаметром 11 и 9,5 мм и длиной 660 мм. Пламя погасло в трубке диаметром 8,5 мм.

Это незначительное различие в критических диаметрах гашения пламени можно объяснить следующим образом. При распространении пламени снизу вверх в трубке подкритического диаметра (15 мм), закрытой сверху, видимая скорость распространения пламени составляет $\sim 0,10$ м/с. При таких малых скоростях существенную роль в процессе распространения пламени начинает играть конвективный подъем нагретых продуктов сгорания. Несгоревшая горючая смесь, выход которой вверх закрыт, начинает обтекать поверхность фронта пламени, растягивая его, отнимая у него тепло, понижая температуру горения, в результате чего горение в трубке прекращается, несмотря на то, что диаметр трубки больше критического. Это явление аналогично влиянию конвективных потоков на распространение пламени вблизи концентрационных пределов и на самих пределах [6]. Теория конвективных пределов распространения пламени была сформулирована в работе [7]. В том случае, когда верхний конец трубки открыт, при распространении фронта пламени снизу вверх (видимая скорость распространения увеличивается в десятки раз) несгоревшая еще смесь свободно вытесняется в атмосферу под действием конвективного движения и расширения нагретых продуктов сгорания. При этих условиях фактически нет движения холодной горючей смеси вдоль поверхности фронта пламени, нет дополнительного отвода тепла и растяжения фронта, в результате чего пламя может распространяться в трубках несколько меньшего диаметра.

Если в отношении $\delta_{кр}/\delta_{щкр}$ подставить определенную величину $\delta_{кр}=9$ мм, то $\delta_{кр}/\delta_{щкр}=2,9$, что хорошо согласуется с соответствующей средней величиной (3,0) для других горючих газов и паров. В дальнейшем опыты по определению критических условий гашения пламени проводили с трубками, длина которых в 20 раз превышала их диаметр.

Чтобы выяснить возможность поджигания аммиачно-воздушной смеси в широкой трубке пламенем, прошедшим сквозь узкий капилляр, в следующей серии опытов (см. рисунок, б) к узкой трубке 2 сверху присоединили трубку 6 диаметром 40 мм и длиной 430 мм. Горючую смесь подавали через верхний конец трубки 6. Перед поджиганием смеси верхний конец трубки открывали. При поджигании смеси пламя распространялось по трубке 1, проходило через трубку 2 и поджигало смесь в трубке 6. Таким образом пламя подожгло смесь в трубке 6, пройдя через трубки 2 диаметром 15, 11, 10 и 9 см. В случае применения трубки диаметром 8 мм и длиной 150 мм пламя проникало в нее на высоту 70—120 мм. Если перед поджиганием верхний конец трубки 6 был закрыт, то пламя, как и в предыдущей серии опытов, не могло распространяться по трубке 2 диаметром 11 мм и меньше.

Были изучены также условия, в которых возможно распространение пламени аммиачно-воздушной смеси сверху вниз, и определен критический диаметр гашения пламени. Между вертикально расположенными трубками диаметром 47 мм помещали пластины 7 толщиной 2 мм с соосно расположенными отверстиями различных диаметров (см. рисунок, в). Высота верхней трубки 6 150 мм, нижней — 270 мм. После продувки трубок сверху производили поджигание в аммиачно-воздушной смеси на высоте 60 мм над отверстием пластины. Если пластины имели отверстия диаметром до 30 мм, пламя распространялось в верхней трубе в обе стороны от места поджигания, доходя до отверстия пластины 7 и продолжая еще примерно в течение секунды гореть над ним. Однако ни в одном опыте не происходило проскока пламени через отверстие в нижнюю трубу.

В условиях проведенных опытов распространение пламени аммиачно-воздушной смеси сверху вниз можно объяснить следующим образом. После поджигания нагретые продукты сгорания поднимаются вверх, вследствие чего из нижней трубки через отверстие пластины начинает поступать аммиачно-воздушная смесь. Фронт пламени разделяется на две части: верхняя распространяется вверх по трубе, нижняя в течение непродолжительного времени (десятые доли секунды) продолжает гореть на одном уровне или чуть ниже электродов. Поступающая снизу через отверстие пластины струя свежей смеси возмущает нижнюю часть фронта пламени, приводя к значительному увеличению его поверхности. В результате этого пламя распространяется вниз до отверстия и над ним еще примерно в течение секунды, как на бунзеновской горелке, продолжает догорать смесь, поступающая снизу за счет перепада давлений.

Факт распространения пламени смеси сверху вниз вследствие только турбулизации его поверхности подтверждается тем, что в случае применения пластин с диаметром отверстий более 30 мм пламя вниз не распространяется. В этом случае после поджигания свежая смесь проходит через отверстие большого диаметра ламинарным потоком и не турбулизует поверхность фронта пламени.

Решающая роль турбулизации фронта пламени в процессе распространения пламени аммиачно-воздушной смеси сверху вниз подтверждается также тем, что если перед поджиганием нижнее отверстие нижней трубки закрыть, то пламя вниз распространяться не будет (хотя диаметр отверстий пластин менее 30 мм). Если источник поджигания

поднять над отверстием на большее расстояние (350 мм, при сохранении расстояния от источника поджигания для верхнего среза трубы), то пламя вниз также не распространяется, так как в этом случае до подхода к фронту пламени происходит выравнивание скорости газового потока по всему сечению трубы.

Пламя также начинает распространяться сверху вниз, если сверху трубы создать сопротивление выходящей горючей смеси и нагретым продуктам сгорания. Так, например, если верхнюю трубу (см. рисунок, *в*) прикрыть пластиной толщиной 2 мм с отверстием 40 мм, пламя уже не только доходит до пластины с отверстием, расположенной между трубками, но и проходит в нижнюю трубку через отверстия диаметром 23 и 20 мм и гаснет в отверстии диаметром 16 мм.

При увеличении расстояния до 350 мм от места поджигания до пластины 7 между трубками верхнее отверстие пластины следует уменьшить до 9—15 мм, чтобы пламя смогло распространиться до нижней пластины. Критический диаметр отверстия пластины для этих условий равен 12 мм. Через отверстие диаметром 11 мм в нижнюю трубу проходит конус пламени длиной 50—60 мм, который, однако, не поджигал смесь в нижней трубе.

Ряд опытов провели с закрытым верхним отверстием трубки в момент поджигания, однако это не привело к уменьшению критического диаметра гашения пламени. Для проверки влияния в данных условиях высоты гасящего канала на критический диаметр гашения пламени провели опыты с трубками, которые располагали между трубками 1 и 6 (см. рисунок, *в*). Верхний конец трубки 6 был прикрыт пластиной с отверстием диаметром 15 мм. Оказалось, что пламя проходит через трубу диаметром 14 мм, длиной 280 мм, поджигая смесь в нижней трубе, и гаснет в трубке диаметром 11 мм и длиной 220 мм.

Проведенные опыты показали, что даже при постоянстве давления в процессе горения величина критического диаметра гашения пламени стехиометрической аммиачно-воздушной смеси зависит от направления и характера распространения пламени, аппаратурных условий (открытый или закрытый сосуд и др.).

Таким образом, установлено, что при атмосферном давлении и комнатной температуре в условиях отсутствия роста давления при распространении пламени снизу вверх критический диаметр гашения пламени стехиометрической аммиачно-воздушной смеси равен 9 мм. Величина критического диаметра гашения пламени смеси даже при постоянстве давления в процессе горения зависит от условий опыта. При атмосферном давлении и комнатной температуре в распространении пламени сверху вниз решающую роль играет турбулизация поверхности фронта пламени.

*Поступила в редакцию
25/VIII 1974*

ЛИТЕРАТУРА

1. Flameproof Enclosure of Electrical Apparatus. London, British Standards Institution 1957, p. 229.
2. J. R. Grove. Third Symposium on Chemical Process Hazards with Special Reference to Plant, Design, London, 1967, p. 51.
3. A. G. White. J. Chem. Soc., 1922, 121, 1688.
4. O. Schliephake, A., Nagel, J. Schemel. Z. für angew. Chemie, 1930, 43, 302.
5. Аналитический контроль производства в азотной промышленности, Госхимиздат, вып. 2, 1956, с. 24; вып. 8, 1958, с. 48.
6. Б. Льюис, Г. Эльбе. Горение, пламя и взрыв в газах. М., «Мир», 1968, с. 267.
7. Л. А. Ловачев. Докл. АН СССР, 1970, 193, 3, 634.