

УДК 614.841.12

**ВЛИЯНИЕ АЭРОЗОЛЯ, ОБРАЗУЮЩЕГОСЯ
ПРИ БЫСТРОМ ИСПАРЕНИИ ПЕРЕГРЕТОЙ ВОДЫ,
НА ГОРЕНИЕ МЕТАНОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ
В ЗАМКНУТОМ СОСУДЕ**

*А. Я. Корольченко, Ю. Н. Шебеко, А. В. Трунев,
В. Ю. Навценя, С. Н. Папков, А. А. Зайцев*

*Всероссийский НИИ противопожарной обороны,
143900 Балашиха-3*

Экспериментально исследовано влияние аэрозоля, образующегося при быстром испарении перегретой воды с температурой 150 °С, на горение метановоздушной смеси в замкнутом сосуде окосферической формы объемом 20 дм³. Определены концентрационные пределы распространения пламени и нормальная скорость горения в зависимости от массовой концентрации водяного аэрозоля. Выявлена низкая флегматизирующая способность аэрозоля, вызванная образованием капель воды достаточно большого размера. Флегматизирующая эффективность аэрозоля практически полностью обусловлена наличием в нем насыщенного водяного пара. Обнаружено экспоненциальное уменьшение нормальной скорости горения смеси с ростом концентрации аэрозоля перегретой воды.

В настоящее время в качестве эффективного огнетушащего средства все более широкое распространение получает аэрозоль, образующийся при быстром испарении перегретой воды [1]. Основное преимущество этого средства по сравнению с традиционным механическим распылом воды заключается в возможности получения более высокодисперсного аэрозоля, огнетушащая эффективность которого по отношению к диффузионным пламенам выше.

Представляет интерес исследование возможности применения аэрозоля перегретой воды не только для тушения диффузионных пламен, но и для флегматизации предварительно перемешанных парогазовых смесей. Известно [2–4], что воздействие относительно крупнодисперсной воды (размеры капель ~ 1 мм) на пламена предварительно перемешанных смесей приводит не к флегматизации, а к интенсификации процесса горения. В работе [5] отмечено, что для эффективной флегматизации парогазовых смесей размер капель воды не должен превышать 10 мкм. Хотя дисперсный состав капель аэрозоля перегретой воды не изучен, представляется разумным предположить наличие в нем достаточно мелких водяных капель, способных флегматизировать процессы горения.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию влияния аэрозоля, образующегося при быстром испарении перегретой воды, на горение метановоздушных смесей в замкнутом сосуде. Определены концентрационные пределы распространения пламени (КПР) и нормальная скорость горения S_u смесей метан — воздух — аэрозоль перегретой воды. В отдельных опытах вместо метана использовали пары этанола.

Опыты проводили на экспериментальной установке, схема которой показана на рис. 1. Реакционный сосуд, изготовленный из нержавеющей стали, имеющий форму, близкую к сферической, и объем 20 дм³, был рассчитан на рабочее давление $p \leq 2$ МПа. Установка снабжена дополнительно следующими элементами: датчик давления с постоянной времени $\sim 3 \cdot 10^{-3}$ с, источник зажигания, штуцера для подачи газов и перегретой воды, система регистрации сигнала с датчика давления в виде заломиняющего осциллографа С9-8. В качестве источника зажигания использовали

пережигаемую пихромовую проволоку (энергия зажигания ~ 10 Дж), расположенную в геометрическом центре реакционного сосуда. Перегретая вода подавалась в реакционный сосуд из замкнутой обогреваемой термостатированной емкости объемом 0,3 или 1,2 дм³ (в зависимости от подаваемого количества жидкости). Температура воды во всех опытах составляла 150 °С, поскольку перегретая вода именно этой температуры используется для целей пожаротушения [1]. Емкость для подготовки перегретой воды снабжена термопарой для измерения температуры жидкости и манометром для измерения давления насыщенного пара. Указанная емкость расположена непосредственно над реакционным сосудом и отделена от него запорным вентилем.

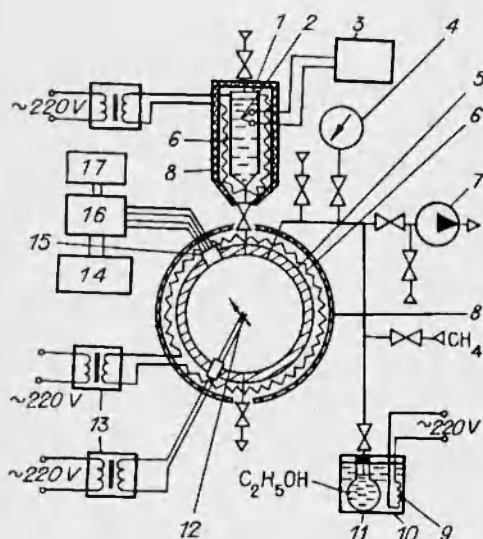


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:

1 — емкость с перегретой водой; 2 — термопара; 3 — потенциометр КСП-4; 4 — вакуумметр; 5 — реакционный сосуд; 6 — спирали электронагревателей; 7 — вакуумный насос; 8 — теплоизоляция; 9 — электронагреватель воды; 10 — водяная баня; 11 — кювета со спиртом; 12 — источник зажигания; 13 — трансформаторы; 14 — осциллограф С9-8; 15 — датчик давления; 16 — усилитель; 17 — источник постоянного тока.

Через фиксированное время после подачи перегретой воды (обычно 5 с) включали источник зажигания.

Давление в реакционном сосуде регистрировали в течение всего опыта (от момента начала поступления перегретой воды до падения давления после охлаждения продуктов сгорания). Принимали, что имеет место распространение пламени по горючей смеси, если повышение давления в реакционном сосуде после инициирования процесса горения превышало 30 кПа. При этом начальное абсолютное давление $p = 100 \div 150$ кПа, максимальное абсолютное давление взрыва, рассчитанное термодинамически, составляет 400–900 кПа (в зависимости от состава смеси, времени задержки зажигания и количества подаваемой перегретой воды). Выбор предельного для фиксации распространения пламени давления 30 кПа условный и характеризует, в том числе, случаи сгорания околопредельных смесей в режиме, когда возможно распространение пламени только снизу вверх с малой полнотой выгорания. С другой стороны, повышение давления в со-

Методика проведения эксперимента состояла в следующем. В емкость для подготовки перегретой воды при комнатной температуре заливалось заранее отмеренное количество дистиллированной жидкости. Емкость затем герметизировалась и нагревалась до требуемой температуры. Горючую газо- или паровоздушную смесь готовили по парциальным давлениям в предварительно отвакуумированном до остаточного давления не более 0,1 кПа реакционном сосуде с выдержкой не менее 30 мин для перемешивания. Затем на короткое время (не более 1 с) обогреваемая емкость соединялась с реакционным сосудом. В результате некоторое количество перегретой воды попадало в реакционный сосуд и быстро испарялось, образуя пароаэрозольную смесь с предварительно приготовленным горючим газозооушным составом. Через фиксированное время

суде при срабатывании источника зажигания в заведомо негорючей смеси (например, в воздухе) существенно (более, чем на порядок) ниже указанной пороговой величины.

Величину КПП определяли как среднее арифметическое двух концентраций, при одной из которых происходило не менее трех воспламенений, а при другой — не менее трех «отказов» (фактов отсутствия распространения пламени) [6]. Количество перегретой жидкости, вышедшей в объем реакционного сосуда, определяли как разницу масс первоначально помещенной в обогреваемую емкость воды и воды, оставшейся в этой емкости после опыта при остывании ее до комнатной температуры.

Нормальную скорость горения определяли по методике, предложенной в работе [7] и развитой затем в стандарте [6], суть которой заключается в следующем. Проводится численное моделирование процесса распространения пламени в замкнутом сосуде сферической формы при центральном зажигании по методике [8]. При этом показатель адиабаты для свежей смеси γ_u вычислялся в предположении изоэнтропического испарения перегретой воды с учетом того, что только пар дает вклад в величину γ_u . Зависимость нормальной скорости горения от безразмерного давления π в процессе адиабатического взрыва описывается выражением

$$S_u = S_{u_i} \pi^\varepsilon,$$

где S_{u_i} — значение нормальной скорости горения при начальных давлении и температуре; ε — обобщенный термокинетический показатель для свежей смеси. Путем многократного численного моделирования сгорания газо- и паровоздушной смеси в замкнутом сосуде определяются параметры S_{u_i} и ε , обеспечивающие наилучшее согласие расчета и эксперимента на участке кривой давление — время от значения давления $0,1p_{\max}$ (p_{\max} — максимальное давление взрыва) до p_* , отвечающего точке перегиба указанной кривой.

Относительная погрешность определения нормальной скорости горения не более 20 %, других измеряемых величин — не более 10 %.

Типичная зависимость давления в реакционном сосуде при напуске перегретой воды и в результате конденсации водяного пара без зажигания и с инициированием горения показана на рис. 2. Максимум кривой на рис. 2,а соответствует моменту окончания подачи перегретой воды в реакционный сосуд (штриховая линия). Рост давления обусловлен подачей в реакционный сосуд вместе с аэрозолем также и водяного пара, а падение давления — его конденсацией. По сути кривая на рис. 2,а показывает изменение парциального давления водяного пара во времени. Через промежуток времени ~ 10 с давление возвращается к своему первоначальному значению. Через 5 с (т. е. в момент зажигания смеси) избыточное давление в реакционном сосуде (давление насыщенного водяного пара) $\Delta p \sim 40$ кПа. Величина Δp в реакционном сосуде в момент зажигания фиксировалась в каждом из опытов. Температура паровоздушной смеси составляла в момент зажигания 60–80 °С. Осциллограмма давления при напуске перегре-

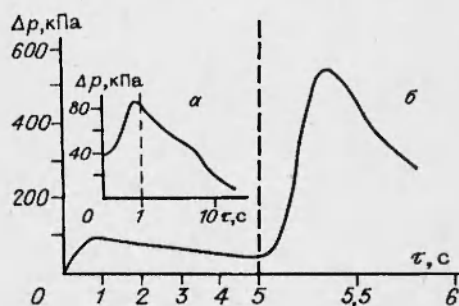


Рис. 2. Зависимость избыточного давления в реакционном сосуде (давление водяного пара) от времени при напуске перегретой воды и после него без зажигания (а) и при инициировании горения (б); $c_{\text{CH}_4} = 9,5$ %. Концентрация аэрозоля 22 г/дм³.

тупа. Осциллограмма давления при напуске перегре-

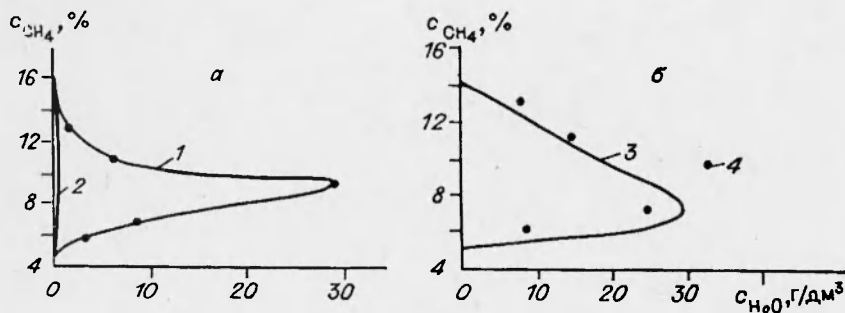


Рис. 3. Концентрационные пределы распространения пламени метана в воздухе c_{CH_4} в зависимости от массовой концентрации аэрозоля перегретой воды и водяного пара:

а) 1 — перегретая вода; 2 — водяной пар [9]; б) 3 — данные [9]; 4 — настоящая работа.

той воды в реакционный сосуд и сгорании смеси (рис. 2, б) характеризуется двумя участками: от начала напуска до момента зажигания (штриховая линия) и от момента зажигания до полного сгорания смеси. Вторым участком типичен для сгорания газо- и паровоздушных смесей в замкнутом сосуде и использован нами для расчета нормальной скорости горения.

На рис. 3 представлена зависимость КПР метана в воздухе от массовой концентрации аэрозоля перегретой воды. Здесь же для сравнения приведена кривая флегматизации метановоздушной смеси водяным паром из работы [9]. Точке флегматизации (мыс кривой) водяным аэрозолем отвечает состав, близкий к стехиометрическому, а флегматизирующая концентрация аэрозоля перегретой воды составляет $29,5 \text{ г/дм}^3$. Отметим, что для стехиометрической смеси паров этанола с воздухом (содержание C_2H_5OH 6,54 % по объему) при $T = 40^\circ C$ (предварительный подогрев стенок реакционного сосуда) флегматизирующая концентрация составляет 32 г/дм^3 .

Величина флегматизирующих концентраций аэрозоля перегретой воды по отношению к стехиометрическим метановоздушной и этаноловоздушной смесям значительно превышает соответствующую флегматизирующую концентрацию водяного пара (см. рис. 3). Данный эффект указывает на вероятное образование в объеме реакционного сосуда достаточно крупных водяных капель (дисперсность 40–50 мкм по оценкам [1]), которые не успевают существенно испариться в узком фронте пламени и, следовательно, не оказывают существенного флегматизирующего воздействия на процесс горения. В связи с этим представляется логичным предположить, что флегматизирующий эффект аэрозоля перегретой воды сводится к влиянию образующегося при быстром испарении водяного пара на сгорание метановоздушной смеси во фронте пламени.

В пользу этого говорят данные рис. 3, б, на котором представлена зависимость КПР метана в воздухе от концентрации водяного пара из [9] вместе с экспериментальными результатами настоящей работы. Соответствующие концентрации водяного пара получены из зарегистрированных в каждом опыте величин избыточного давления в реакционном сосуде в момент зажигания. Наблюдается удовлетворительное согласие данных [9] с результатами настоящей работы. Это свидетельствует о справедливости высказанного предположения, которое качественно подтверждается и тем фактом, что с увеличением времени задержки зажигания величина массовой флегматизирующей концентрации аэрозоля перегретой воды растет.

Низкая флегматизирующая способность аэрозоля перегретой воды по сравнению с водяным паром обусловлена, как отмечено выше, образованием достаточно крупных капель, не успевающих испариться в узком фронте пламени предварительно перемешанной метановоздушной смеси. Это не играет существенной роли при тушении диффузионных пламен (например, при горении проливов горючих жидкостей), так как даже крупные капли успевают испариться в пламени (включая его зону подогрева и продукты сгорания), имеющем существенно большие размеры по сравнению с протяженностью узкого фронта пламени предварительно перемешанных газозвушных смесей. Этим и объясняются различия в эффективности перегретой воды по отношению к тушению диффузионных пламен и флегматизации пламен предварительно перемешанных смесей.

На рис. 4 представлена зависимость нормальной скорости горения S_u метановоздушной смеси от массовой концентрации аэрозоля перегретой воды CH_2O . Наблюдается быстрое уменьшение S_u с ростом CH_2O , носящее экспоненциальный характер. В работе [10] обнаружен аналогичный характер влияния концентрации водяного пара на нормальную скорость горения водородовоздушных смесей, причем показатель экспоненты не зависит от состава смеси. Качественно аналогичная зависимость наблюдается на рис. 4, б при малых концентрациях аэрозоля перегретой воды. При более высоких величинах CH_2O для стехиометрической метановоздушной смеси скорость изменения S_u с ростом концентрации аэрозоля перегретой воды уменьшается, что обусловлено, вероятно, уменьшением массовой доли перегретой воды, переходящей в пар (т. е. снижением эффективности использования перегретой воды).

Следует отметить, что как во время напуска перегретой воды, так и после его окончания до момента зажигания, определенная часть аэрозоля и водяного пара оседает на стенках камеры. В рамках использованной методики оценить это количество не представляется возможным. Как здесь показано, флегматизирующее действие перегретой воды с начальной температурой 150°C обусловлено в основном наличием водяного пара, парциальное давление которого фиксируется вплоть до момента зажигания. Поэтому можно констатировать, что при учете оседания воды на стенках реакционной камеры зависимость измеряемых параметров (КПР и S_u) от реальной массовой концентрации воды в объеме сосуда изменится, однако, вывод о преобладающем влиянии на эти параметры водяного пара останется неизменным.

Таким образом, в настоящей работе экспериментально исследовано влияние аэрозоля, образующегося при быстром испарении перегретой воды, на горение метановоздушной смеси в замкнутом сосуде. Определены концентрационные пределы распространения пламени и нормальная скорость горения в зависимости от массовой концентрации водяного аэрозоля. Выявлена низкая флегматизирующая способность аэрозоля, обусловленная образованием капель воды достаточно большого размера при испаре-

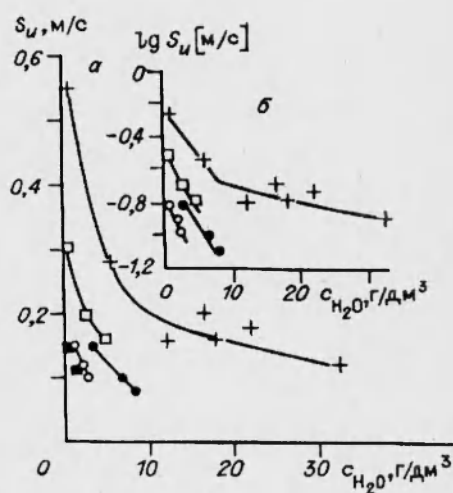


Рис. 4. Зависимость $S_u(\text{CH}_2\text{O})$ для метановоздушной смеси; $c_{\text{CH}_4} = 6$ (■), 7 (●), 9,5 (+), 11 (□), 13 % (○).

нии перегретой воды с температурой 150 °С. Флегматизирующая эффективность аэрозоля практически полностью обусловлена наличием в нем насыщенного водяного пара. Обнаружено экспоненциальное уменьшение нормальной скорости горения метановоздушной смеси с ростом концентрации аэрозоля перегретой воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безродный И. Ф., Стареньков А. Н. Высокоэффективный способ тушения пожаров водой аэрозольного распыла // Пожарная безопасность, информатика и техника. 1993. № 1 (3). С. 72-74.
2. Carcassi M., Fineschi F., Lombardi G. Air-hydrogen deflagration tests at the University of Pisa // Nucl. Eng. and Design. 1987. V. 104, N 3. P. 241-247.
3. Макеев В. И., Пономарев А. А., Стогонов В. В. и др. Особенности горения и переход к детонации газовых смесей при орошении водой // IX Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву. Черногловка, 1989. С. 50-53.
4. Шебеко Ю. Н., Цариченко С. Г., Еременко О. Я. и др. Горение бедных водородовоздушных смесей в потоке распыленной воды // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 4. С. 58-61.
5. Mitani T., Niioka T. Extinction Phenomenon of Premixed Flames with Alkali Metal Compounds // Combust. and Flame. 1984. V. 55, N 1. P. 13-21.
6. ГОСТ 12.1.044-89. Пожаро-и взрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. М.: Изд-во стандартов, 1989.
7. Мольков В. В., Бухаров В. Н., Бабкин В. С., Баратов А. Н. Определение нормальной скорости пламени методом обратной задачи в бомбе постоянного объема // Пожарная профилактика. М., 1986. С. 37-48.
8. Бабкин В. С., Сеначин П. К., Крахтинова Т. В. Особенности динамики сгорания газа в закрытых сосудах при разных законах изменения поверхности пламени // Физика горения и взрыва. 1982. Т. 18, № 6. С. 14-20.
9. Coward H. F., Jones G. W. Limits of flammability of gases and vapours. Wash., 1952. 144 p. (Bull./Bureau of Mines; 503)
10. Lui D. D. S., Mac Farlane R. Laminar burning velocities of hydrogen-air and hydrogen-air-steam flames // Combust. and Flame. 1983. V. 49, N 1-3. P. 59-71.

*Поступила в редакцию 15/IV 1994 г.,
в окончательном варианте — 18/VIII 1994 г.*
