

**ПРЕДЕЛЫ ПОДЖИГАНИЯ
ВОЗДУШНЫХ ГОРЮЧИХ СМЕСЕЙ
НАГРЕТЫМИ ТЕЛАМИ**

Т. А. Понизко, А. И. Розловский
(Москва)

ПОДЖИГАНИЕ И САМОВОСПЛАМЕНЕНИЕ

Вопрос об условиях возникновения нестационарного самоускоряющегося режима реакции во взрывчатых газовых смесях при соприкосновении с нагретыми твердыми телами представляет важную задачу для обеспечения взрывобезопасности ряда производств, в частности, при использовании нагревающегося оборудования во взрывоопасных помещениях. Тепловой режим такого процесса — поджигание холодной горючей смеси бесконечной плоской стенкой — был впервые рассмотрен Я. Б. Зельдовичем [1].

Решение уравнения теплопроводности было в дальнейшем уточнено путем учета обеднения горючей смеси в результате выгорания на основе подобия полей температуры и концентрации [2, 3], что позволило получить зависимость критической температуры поджигания T_s от размера d поджигающего тела и относительной скорости газового потока w , в предположении степенной зависимости скорости реакции от концентрации недостающего компонента.

Проверка этой зависимости путем обработки имевшихся экспериментальных данных [4—6] обнаружила весьма ограниченную ее применимость. Отклонения от требований теории были объяснены искажениями, возникающими в результате перехода реакции из кинетической области в диффузионную [3], а также нестационарностью условий теплоотвода от поджигающего тела [7].

Абсолютные величины T_s для стационарного теплового режима, вычисленные путем сопоставления закономерностей поджигания и нормального горения, менее искажаемы возмущающими факторами. В случае заметного влияния последних расчет дает нижнюю границу величины T_s . При нестационарности теплоотдачи от поджигающего тела и возникновении тепловых потерь путем излучения наблюдаемые значения T_s еще более возрастают по сравнению с расчетными.

Таким образом, теория [1] дает способ оценки нижней границы величины T_s , что, казалось бы, достаточно для решения задач обеспечения взрывобезопасности. Опыт показывает, что в согласии с требованиями теории минимальное наблюдаемое значение T_s у наиболее опасных воздушных горючих смесей при любых аппаратурных условиях составляет 700—800°С, а в большинстве случаев она гораздо выше (см. таблицу).

Критические условия поджигания различных горючих воздушных смесей*

Горючее	Состав горючего, %	T_s , °C	Поджигающее тело	d , мм	ω , м/сек	Литературный источник
Водород	Стехиометрический	880	Металлический стержень	6,3	60	[6]
Ацетилен	То же	823	То же	6,3	50	[6]
Сероуглерод	»	768	»	6,3	25	[6]
Окись этилена	»	880	»	6,3	25	[6]
Пентан	»	1120	»	6,3	25	[6]
Окись пропилена	»	1070	»	6,3	25	[6]
Бензин	»	1163	»	6,3	25	[6]
Метил-этиловый кетон	»	1105	»	6,3	25	[6]
Этиловый эфир	»	1063	»	6,3	25	[6]
Пропионовый альдегид	»	1072	»	6,3	25	[6]
Метанол	»	1003	»	6,3	25	[6]
Изопропиловый эфир	»	1173	»	6,3	25	[6]
Ацетон	»	1173	»	6,3	25	[6]
Гептан	»	1100	»	6,3	25	[6]
Скипидар	»	1120	»	6,3	25	[6]
Коксовый газ	10	850	Шарики из кварца и платины	5	2-5	[4]
Пентан	3	1060	То же	5	2-5	[4]
Водород	20	800	»	5	2-5	[4]
Природный газ (93,2%) CH_4	2,5-14%	940	Металлические стержни	37	Свободная конвекция	[10]
То же	2,5-14%	1180	То же	112	То же	[10]
Коксовый газ	20	790	Шарики из кварца	5	1,2	[5]
То же	20	1020	Шарики из платины	2	27	[5]
Метан	Стехиометрический	1160	Латунные и железные сетки	—	—	[11]
Метан	»	Не поджигается	Вольфрамовая нить	0,020—0,025	—	[11]
Водород	»	800	Вольфрамовая и платиновая проволока	0,025—0,050	Свободная конвекция	[12]
Метан	»	1470	То же	0,025—0,050	То же	[12]
10% C_3H_8 + 45% O_2 + 45% N_2	»	1400	»	0,025—0,050	»	[12]
Пропан	»	>900	Толстая никромовая проволока	—	7-100	[13]
Бензин, бензол	»	920	Металлическая лента	2,2	Свободная конвекция	[14]
Водород	»	690	Нихромовая проволока	1,0	То же	[15]
Бензол	»	1130	То же	1,0	»	[15]

* Здесь не приводятся данные [16], по-видимому, имеющие систематическую ошибку (описывается поджигание негорючих смесей).

Поджигание в опытах производилось большей частью в потоке нагретыми шариками, стержнями, пластинами с характерным размером (d) в несколько миллиметров, а также накаляемыми электрическим током проволоками диаметром 20—50 мк и сетками.

Еще выше T_s при поджигании воздушных горючих смесей фрикционными «искрами» стали, температура которых равна 1600—1700° С. В этом случае поджигаются смеси только пяти наиболее опасных горючих: H_2 , C_2H_2 , C_2H_4 , CO и CS_2 . Такие высокие T_s обусловлены нестационарностью теплоотвода от малого движущегося поджигающего тела к горючей среде [7].

Трудность поджигания горючих смесей нагретыми телами дает основание полагать, что использование во взрывоопасных помещениях неискрящего нагревающегося оборудования, не имеющего полостей, не создает реальной возможности инициирования очага горения. Однако действующие государственные Правила изготовления взрывозащищенного электрооборудования (ПИБЭ) [8] накладывают жесткие ограничения на допустимую температуру оболочек взрывонепроницаемого¹ оборудования.

Указывалось [9], что в основу такого регламентирования неосновательно положены значения температуры самовоспламенения в нагретом сосуде T_i , а не температуры поджигания холодного газа нагретым телом T_s . Значения T_i отличаются большими невоспроизводимыми колебаниями ввиду каталитического действия стенок реактора; T_i сильно зависит от условий опыта.

Однако независимо от недостоверности значений T_i такая система связана с принципиальной погрешностью ввиду существенного отличия теплового режима реакции в горючей смеси при использовании нагревающегося оборудования от режима реакции в нагретом сосуде. При поджигании нагретым телом теплоотдача из зоны реакции в холодную исходную смесь гораздо интенсивнее, чем при самовоспламенении, когда тепло отводится к нагретым стенкам реактора. В результате величина T_s , характеризующая условия эксплуатации нагреваемого оборудования, много выше соответствующих наблюдаемых значений T_i . В связи с этим было предложено регламентировать тепловые режимы использования взрывозащищенного электрооборудования значениями T_s , а не T_i .

В Правилах [8], классифицирующих горючие газы и пары, которые могут попадать в атмосферу взрывоопасных помещений, по условно установленным для них значениям T_i воздушных смесей, зафиксированы, например, следующие значения допустимых температур наружных деталей электрооборудования.

Взрывоопасные газы и пары

Группа А: аммиак, метан, дихлорэтан, этан, пропан, толуол, бензин-100, этилен, светильный газ, водород, водяной газ — 360° С;

группа Б: ацетилен, уксусный ангидрид, метанол, этанол, метилметакрилат, бутан, пентан, пропилен, фурфурол, окись этилена, окись пропилена, нитроциклогексан, метиламин — 240° С;

группа Г: уайт-спирит, циклогексан, скипидар, гексан, ряд моторных топлив и бензинов, диэтиловый эфир, сероводород, ряд хлорсиланов, триметиламин — 140° С;

группа Д: сероуглерод — 100° С.

Эти значения дают основание полагать, что при проектировании взрывозащищенного электрооборудования в конструкции заложены чрезмерные «запасы надежности» по температуре допустимого нагрева.

¹ Т. е. снабженного огнепреградителями, предотвращающими инициирование горения вне оболочки.

Это приводит к излишнему увеличению габаритов, усложнению, снижению мощности и в конечном счете — к значительному удорожанию электрооборудования и его использования.

ОСОБЕННОСТИ ПОДЖИГАНИЯ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ ХОЛОДНЫХ ПЛАМЕН

Приведенные экспериментальные и теоретические данные о закономерностях поджигания все же недостаточны для решения задач обеспечения взрывобезопасности. Они оставляют открытым вопрос о возможности более низкотемпературного поджигания в результате особенностей цепного механизма реакции: при ее автокаталитическом ускорении.

Известно [17], что взаимодействие в нагретом сосуде между компонентами ряда горючих смесей, механизм превращения которых характеризуется вырожденными разветвлениями, в определенных условиях приводит к возникновению холодных пламен. Последние могут появляться за пределами областей концентрации и температуры, в которых образуются обычные горячие пламена.

Холодные пламена могут возникать вне области составов, ограниченной концентрационными пределами распространения пламени (π_{\max} и π_{\min}), т. е. в негорючих, в обычном смысле, смесях, при их поджигании электрическим разрядом или сильно нагретым телом. Спонтанное возникновение холодных пламен во взрывчатых смесях в нагретом реакторе при температуре, меньшей T_i (для возникновения горячего пламени), может приводить к дальнейшему развитию протекающей в них реакции с последующим переходом от холодного пламени к горячему. Этот процесс представляет хорошо известное явление двухстадийного самовоспламенения.

Холодные пламена могут возникать в пределах области концентраций между π_{\min} и π_{\max} и в других условиях. Так, богатые эфирно-воздушные смеси образуют в плоскопламенной горелке два последовательно расположенные пламени: нижнее (по потоку) — холодное и верхнее — горячее [13]. Спенс и Тоуненд [18] наблюдали холоднопламенное и двухстадийное воспламенение взрывчатых смесей при поджигании умеренно нагретыми телами, однако необходимую для этого температуру они не указывают.

Изложенное подтверждает возможность более низкотемпературного, чем соответствующее требованиям теории [1], поджигания взрывчатых смесей, обусловленного холоднопламенным механизмом реакции. Однако в описанных выше исследованиях низкотемпературное поджигание не наблюдалось, что свидетельствует о неблагоприятных для развития холоднопламенной реакции условиях.

Очевидно, это — недостаточная продолжительность высокотемпературного процесса генерирования активных продуктов в газовом потоке, омывающем нагретое тело, препятствующая их должному накоплению. Можно ожидать, что холоднопламенное поджигание будет осуществляться при режиме свободной конвекции, реализующемся при использовании нагреваемого оборудования. Для определения допустимых безопасных температур следовало определить границы поджигания в приборе, моделирующем реальный процесс использования оборудования, помещая нагреваемую модель испытуемого оборудования в камеру, заполненную холодной взрывчатой смесью заданного состава.

Такой способ определения безопасных допустимых температур нагревания и устройство для его осуществления были предложены к техническому использованию [19]. По этому несколько усовершенствованному здесь способу были определены границы поджигания воздушных смесей ряда горючих газов и паров.

МЕТОДИКА ОПЫТОВ

Схема установки показана на рис. 1. Исследуемые смеси составлялись в герметичных цилиндрических стальных камерах ($V=17$ и 73 л, $\varnothing=330$ и 400 мм соответственно), имеющих электроподогревающие устройства и терморегуляторы для термостатирования при температурах до 150°C , что позволяло достигать желаемого давления насыщенного пара соответствующих компонентов. Нагреваемые поджигатели, играющие роль макетов оболочек электрооборудования, устанавливались в середине камеры. Подогревающие устройства размещались

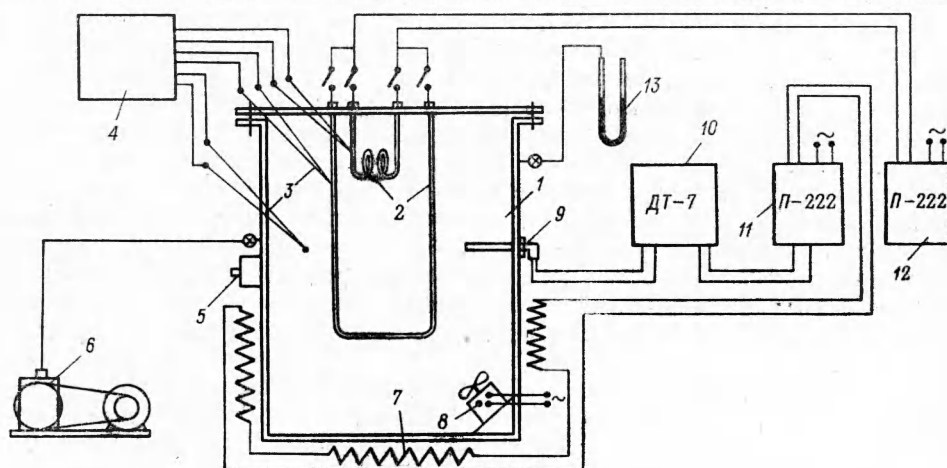


Рис. 1. Схема установки.

1 — корпус взрывной камеры; 2 — поджигатели; 3 — термопары; 4 — автоматический записывающий электронный потенциометр; 5 — разгрузочный клапан; 6 — насос; 7 — электроподогреватели; 8 — вентилятор; 9 — датчик терморегулятора; 10 — терморегулятор; 11, 12 — пускатели; 13 — манометр.

вдоль боковой и донной стенок; замеры показали, что разница температуры по высоте камеры не превосходит 5° . 17-литровая камера была снабжена крышкой из термостойкого стекла для фотографирования и визуального наблюдения пламени.

Использовались следующие поджигатели: U-образные (а) и спиральные (б) стальные трубы диаметром $10,5$ мм с шагом 18 мм, диаметром витка 92 мм; кварцевые трубы (в), диаметром 24 мм, длиной 215 мм; лампы накаливания мощностью 100 и 220 в, диаметром 61 мм (г), температура поверхности их оболочек достигала 315°C . Внутри трубок (а, б и в) размещались нагревательные элементы — нихромовая спираль или карборундовый стержень, их концы выводились наружу.

Для исключения контакта между нагревательным элементом и горючей смесью стальная труба вваривалась в отверстие в крышке камеры, у кварцевой трубы свободное пространство засыпалось порошком

из жженой магнезии. Температура поджигания определялась с помощью термопар медь — константан (до 400°), хромель — копель (до 700°) и платинородий — платина (до 1300°) диаметром 0,3, 0,6 и 0,3 мм соответственно. Инерционность показаний термопар не превышала 1 сек.

Для закрепления термопар на металлических трубах имелось углубление около 1 мм, в котором помещался горячий спай; сверху накладывался асбестовый теплоизолирующий слой. На кварцевой и стеклянной поверхностях термопары закреплялись с помощью полоски из медной фольги шириной 5 мм, приклеивавшейся жидким стеклом. Температура поджигателя замерялась в наиболее нагретой части, определявшейся с помощью термокрасок. Погрешность измерения температуры не превышала 5°.

Взрывная камера термостатировалась при заданной температуре и продувалась воздухом для удаления продуктов сгорания от предыдущего опыта, после чего в ней составлялась исследуемая смесь. В случае газообразных горючих в камере создавалось небольшое разрежение; дозировка производилась по значениям парциальных давлений компонентов, измерявшихся ртутным манометром. Парообразные компоненты дозировались в жидком состоянии по величине навески, вводимой через кран в крышке камеры. Данные дозировки проверялись анализом.

После составления смесь в камере перемешивалась с помощью вентилятора, затем включался ток в поджигатель. Нагревание продолжалось 2—5 мин со скоростью порядка 60 град/мин. Температура в момент поджигания фиксировалась визуально по отметке фотоэлемента или по резкому излому на осциллограмме нагревания. Выгорание за предвзрывной период обычно было невелико. Так, за 142 мин содержание эфира в смеси с воздухом при температуре, близкой к T_s , уменьшилось от 4,0 до 3,75%.

Содержание диэтилового эфира и этилового эфира этиленгликоля определялось хроматографически и путем окисления бихроматом в кислой среде с последующим иодометрическим замером избытка бихромата. Оба метода давали удовлетворительно согласующиеся между собой результаты. Сероуглерод, ацетилен, водород и метан определялись объемным методом. Сероуглерод поглощался спиртовым раствором алкоголята калия, ацетилен — раствором азотнокислой ртути, водород и метан сжигались на платиновой спирали. Для бензина Б-70, на основании данных [20], принималось, что средний молекулярный вес $\bar{M}=105$, эффективный стехиометрический коэффициент при реакции с кислородом $\nu=11,2$.

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ПОДЖИГАНИЯ

Исследовалось поджигание воздушных смесей следующих горючих газов и паров: метана, водорода, бензина Б-70, ацетилена, сероуглерода, диэтилового эфира, диэтилового эфира этиленгликоля. На рис. 2 и 3 представлены унифицированные зависимости найденных значений T_s от состава, который как и для пределов распространения пламени, целесообразно характеризовать величиной логарифма коэффициента избытка окислителя α [21].

Результаты, полученные для смесей метана, водорода, бензина, эфира этиленгликоля, в принципе сравнимы со сходными данными других исследований поджигания нагретым телом. Смеси метана не

удалось поджечь при максимальной достижимой температуре 900°C ; минимальные зафиксированные температуры поджигания смесей остальных указанных горючих равны 640 , 855 и 640°C соответственно.

Однако смеси сероуглерода и этилового эфира поджигаются при температурах, значительно более низких, чем в вышеописанных исследованиях в потоке газа; их минимальная T_s составляет 180° . У аце-

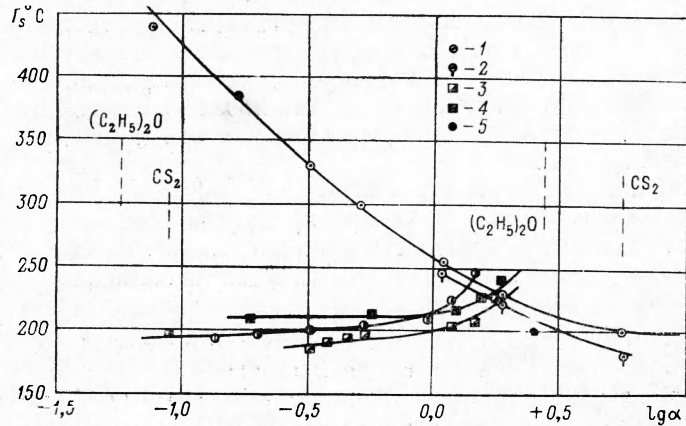


Рис. 2. Температура поджигания воздушных смесей сероуглерода и этилового эфира.

1 — CS_2 , поджигатель (а), $V=73$ л; 2 — то же, поджигатель (б); 3 — $(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}$, поджигатели (а, б), $V=73$ л; 4 — то же, $V=17$ л; 5 — $(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}$, поджигатель (б), $V=73$ л.

тилена минимальная $T_s = 420^{\circ}$, но и такой режим поджигания можно отнести к низкотемпературному. Это явление, несовместимое с тепловым механизмом, может быть объяснено только развитием вырожденных разветвлений, приводящих к появлению холодных пламен с последующим их переходом в тепловой взрыв. Такой механизм включает стадию «химической подготовки» горючей смеси и реализуется, очевидно, только при условии движения газа в пределах свободной конвекции.

Склонность к низкотемпературному поджиганию смесей этилового эфира и сероуглерода соответствует всем имеющимся сведениям о специфике реакций окисления этих продуктов. Известно, что холодные пламена могут распространяться в смесях, содержащих сотые и даже тысячные процента CS_2 [22]. В определенных условиях холодные пламена могут возникать в смесях сероуглерода при 80°C [23]. Склонность смесей этилового эфира к образованию холодных пламен в широком диапазоне составов была обнаружена еще Уайтом [24], а затем неоднократно отмечалась в работах Тоуненда [18, 25, 26].

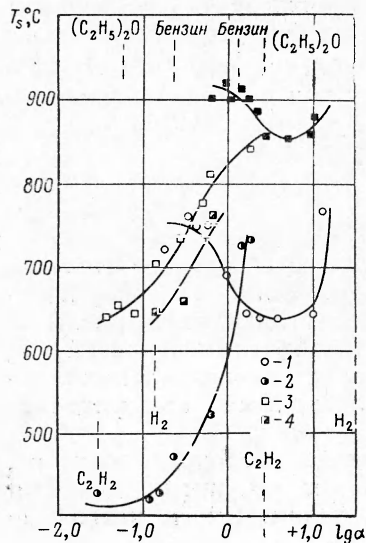


Рис. 3. Температуры поджигания воздушных смесей ацетилена, водорода, этилового эфира этиленгликоля, бензина Б-70.

1 — H_2 , поджигатель (а), $V=73$ л; 2 — C_2H_2 , поджигатель (а), $V=73$ л; 3 — $\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}_2$, поджигатель (а), $V=73$ л; 4 — то же при перемешивании.

Как известно, смеси высших парафиновых углеводородов также дают холодные пламена [17]. Сравнительно высокие T_s бензина и диэтилового эфира этиленгликоля свидетельствуют о гораздо менее выраженной способности этих горючих систем к развитию самоускоряющейся нетепловой реакции. Аналогичны результаты опытов Гельфанда и Зайченко [14, 15], в которых также зафиксированы высокие T_s воздушных смесей бензола и бензина для условий свободной конвекции.

Существенное изменение размеров и формы поджигателя, а также объема взрывной камеры мало влияет на величину T_s , так же, как и перемешивание поджигаемой смеси вентилятором. Наибольший эффект наблюдался для эфира этиленгликоля (см. рис. 3), при этом перемешивание облегчало поджигание. У смесей $(C_2H_5)_2O$ величина T_s также выше для неподвижной смеси, однако всего на 3—4°. У смесей CS_2 соотношение обратное, различие T_s достигает 10°.

Известно, что в холодных пламенах часто образуются перекиси в качестве промежуточного продукта реакции. Было также установлено присутствие перекисей в продуктах взаимодействия этилового эфира с воздухом при докритическом нагревании поджигателя. В качественных опытах образование перекиси оценивалось по количеству иода, выделявшегося из раствора иодистого калия при взаимодействии с определенным объемом газообразных продуктов реакции. Количество иода возрастает с повышением температуры поджигателя и практически не зависит от времени реакции. Добавки перекиси водорода и очистка исходного эфира от перекисей не влияют на величину T_s .

НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОДЖИГАНИЯ

Установленные зависимости температуры поджигания от состава отличаются интересными особенностями. Все исследованные горючие образуют воздушные смеси, которые могут поджигаться в диапазонах концентраций, сравнимых с таковыми для распространения пламени. Соответствующие концентрационные пределы, по данным [27], показаны на рис. 2, 3¹.

У смесей бензина и водорода зависимость T_s от состава обнаруживает характерный минимум в области бедных горючих смесей. У водорода сдвиг минимума, очевидно, обусловлен известным влиянием большого различия коэффициентов диффузии и температуропроводности [28]. Такой характер зависимости $T_s(\alpha)$ позволяет предположить, что поджигание здесь имеет чисто тепловой механизм.

Однако у остальных горючих минимальные T_s отвечают либо самым богатым (оба эфира, ацетилен), либо самым бедным (сероуглерод) смесям. Легче всего поджигаются смеси, близкие к предельным, имеющие минимальные скорости горения, т. е., казалось бы, наиболее флегматичные. В этом сказываются особенности механизма реакции с вырожденными разветвлениями, определяющие склонность к образованию холодных пламен.

Характерно и направление снижения T_s . У сероуглерода, как указывалось, холодные пламена образуются в бедных смесях; присутствие CS_2 в богатых смесях различных горючих не влияет на пределы распространения пламени (см. [21]). Напротив, у смесей этилового эфира холодные пламена легче образуются при избытке горючего. Характер

¹ Сдвиг пределов для бензина можно отнести за счет расхождений данных о составе бензина.

зависимости $T_s(\alpha)$ указывает на то, что для воздушных смесей ацетилена и эфира этиленгликоля вырожденные разветвления также играют заметную роль при реакции. Механизм их поджигания при режиме свободной конвекции нельзя считать чисто тепловым.

При поджигании в потоке зависимость $T_s(\alpha)$ тех же горючих выражена слабо. Это очевидно из результатов исследования поджигания горючих смесей нагретыми струями газа [29, 30]. Тепловой режим в этих опытах аналогичен режиму поджигания твердой стенкой, а абсолютные значения T_s близки к T_s для поджигания у стенки при быстром течении газа. Минимальная $T_s = 655^\circ\text{C}$ наблюдалась для водорода, у ацетилена $T_s \approx 850^\circ\text{C}$.

В целях проверки механизма поджигания был получен ряд скоростных фоторегистраций свечения во взрывной камере при возникновении очага горения в эфировоздушных смесях. Фоторегистрации подтверждают двухстадийный механизм поджигания: холодное пламя с характерно нечеткими контурами переходит в гораздо более яркое горячее пламя с резко выраженной границей фронта. Надо полагать, «холодное» в обычном смысле слова пламя вообще не зафиксировано на фоторегистрциях, а пламя с нечеткими краями представляет так называемое голубое, более горячее. Заметим, что очаг горячего пламени, как это видно на фоторегистрциях, может возникать на определенном удалении от поджигателя.

Проведенными опытами установлено, что поджигание многих горючих смесей при режиме свободной конвекции связано с развитием реакции по механизму вырожденных разветвлений. Поэтому минимальные температуры поджигания, хотя и значительно превосходят наблюдающиеся температуры самовоспламенения, но ниже соответствующих чисто тепловому механизму. Холоднопламенное поджигание при режиме свободной конвекции ранее не наблюдалось ввиду химической специфики объектов соответствующих исследований [10, 12, 14, 15].

Действующие нормы обеспечения взрывобезопасности технологических процессов, безусловно, могут и должны быть пересмотрены. Однако в каждом конкретном случае требуется подробная экспериментальная проверка по описанной здесь методике, моделирующая реальный режим использования нагревающегося оборудования.

ВЫВОДЫ

1. Измерены температуры поджигания нагретыми телами T_s при режиме свободной конвекции для воздушных смесей водорода, ацетилена, сероуглерода, диэтилового эфира, этилового эфира, этиленгликоля, бензина Б-70, метана и зависимость T_s от состава.

2. Установлена возможность поджигания при T_s до 180° , несовместимого с тепловым механизмом. Низкотемпературное поджигание объяснено образованием холодных пламен, связанных с развитием вырожденных разветвлений цепного процесса. Реакция достаточно для этого продолжительна только в условиях свободной конвекции.

3. Двухстадийный механизм, по-видимому, влияет на T_s во многих случаях; при этом минимальные T_s могут соответствовать составам, близким к критическим для распространения пламени.

4. Результаты исследования подтверждают необходимость пересмотра действующих правил безопасности при использовании нагревающегося оборудования во взрывоопасных помещениях. Допустимые температуры должны определяться в условиях поджигания нагретым

телом, моделирующих реальное использование оборудования при возможности холоднопламенного поджигания.

5. С учетом необходимого «запаса надежности» могут быть рекомендованы следующие допустимые температуры нагрева: для CS_2 и $(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}$ — 150° , для C_2H_2 — 300° , для H_2 , эфира этиленгликоля — 500° , бензина Б-70 — 700° , CH_4 — 800°C .

Поступила в редакцию
21/IV 1965

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1939, 9, 1530.
2. Л. Н. Хитрин, С. А. Гольденберг. Докл. АН СССР, 1955, 103, 277.
3. А. И. Розловский. Докл. АН СССР, 1957, 117, 651.
4. R. S. Silver, Phil. Mag., 1937, 23, 156, 633.
5. S. Paterson. Phil. Mag., 1939, 28, 186, 1; 1940, 30, 203, 437.
6. J. U. Muller, J. W. Fenn, M. R. Irby. III Symposium on Combustion, 1949, 231.
7. А. И. Розловский, И. С. Ройзен, П. Г. Суцев. Изв. вузов. «Химия и химическая технология», 1959, 2, 962.
8. Правила изготовления взрывозащищенного электрооборудования, Госэнергоиздат, 1963.
9. А. И. Розловский. Вест. техн. и эконом. информации, 1962, 9, 33.
10. H. F. Coward, P. G. Guest. J. Amer. Chem. Soc., 1927, 49, 2479.
11. П. Ф. Ковалев. Взрывобезопасное рудничное электрооборудование, Канд. дисс., Макеевка, 1953.
12. L. E. Ashman, A. Büchler. Combustion and Flame, 1961, 5, 113.
13. А. Г. Гейдон, X. Г. Вольфгард. Пламя, его структура, излучение и температура. Металлургиздат, 1959.
14. Е. А. Гельфанд. Тр. НИИТБ в нефтяной промышленности, 1954, вып. VII, 58.
15. В. Н. Зайченко, Е. А. Гельфанд. Тр. НИИТБ в нефтяной промышленности, 1956, вып. IX, 64.
16. В. Kaesche-Krischer, H. C. Wagner. Brennstoff—Chemie, 1958, 39, 33.
17. В. Я. Штерн. Механизм окисления углеводородов в газовой фазе, Изд-во АН СССР, 1960.
18. K. Spence, D. T. A. Townend. Nature, 1945, 155, 330.
19. А. И. Розловский, Ю. М. Рибас. Способ определения допустимых безопасных температур нагрева взрывозащищенного электрооборудования и устройство для его осуществления. Авт. свид. № 158433 от 5/IV 1962.
20. П. А. Рагозин. Справочник по авиационным и автомобильным топливам, Гостоптехиздат, 1947.
21. А. И. Розловский. Ж. ВХО им. Д. И. Менделеева, 1962, 7, 651.
22. В. Г. Воронков, Н. Н. Семенов. Ж. физ. хим., 1939, 13, 1695.
23. A. L. Myerson, F. R. Taylor. J. Amer. Chem. Soc., 1953, 75, 4348.
24. A. G. White. J. Chem. Soc., 1927, 498.
25. M. S. Hsieh, D. R. A. Townend. J. Chem. Soc., 1939, 332, 337, 341.
26. J. E. C. Topps, D. T. A. Townend. Trans. Farad. Soc., 1946, 42, 345.
27. H. F. Coward, G. W. Jones. Limits of Flammability of Gases and Vapors, U. S. Bur. Mines, Bull., 1952, 503.
28. Н. П. Дроздов, Я. Б. Зельдович. Ж. физ. хим., 1943, 17, 134.
29. H. G. Wolfhard. Jet Propulsion, 1958, 28, 798.
30. H. G. Wolfhard, M. Vanpée. VII Symposium on Combustion, 1959, 446.