

8. Бузыкин О.Г., Бурмистров А.В., Калабушкин О.И. и др. Исследование условий инициирования самоподдерживающейся реакции окисления при многоимпульсном нагреве металла // ЖТФ. — 1989. — 59, вып. 5. — С. 20.

140160, г. Жуковский, 3
ЦАГИ

Поступила в редакцию
2/VI 1993

УДК 614.841.17

Ю.Н. Шебеко, С.Г. Цариченко, А.В. Трунев,
А.Я. Корольченко, А.Ю. Каплин

ФЛЕГМАТИЗАЦИЯ ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ ПАРОГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ДАВЛЕНИЯХ

Экспериментально найдены концентрационные пределы распространения пламени в смесях водород — кислород — инертный разбавитель (гелий, аргон, диоксид углерода, водяной пар) при температурах до 523 К и давлениях до 2 МПа и значение нормальной скорости горения смесей $H_2 - O_2 - N_2$ при температурах 293 К и давлении до 4 МПа. Выявлено аномальное влияние гелия на величину нижнего концентрационного предела распространения пламени в смеси водород — кислород — гелий. Обнаружен эффект синергизма для составных флегматизаторов гелий — диоксид углерода и гелий — водяной пар. Дана теоретическая интерпретация полученных данных на основе представлений о существенной роли избирательной диффузии водорода и гелия из свежей смеси во фронт пламени.

Флегматизация водородсодержащих парогазовых смесей рассматривается как с точки зрения развития представлений о предельных условиях горения, так и с точки зрения обеспечения взрывобезопасности технологических процессов. В литературе имеется большое количество публикаций, посвященных определению концентрационных пределов распространения пламени (КПР) и нормальной скорости горения S_u водородсодержащих смесей при давлениях и температурах, близких к нормальным (см., например, [1—3]). В то же время в области повышенных параметров эти данные немногочисленны.

В работе [4] экспериментально определены верхние концентрационные пределы распространения пламени (ВКПР) в смесях $H_2 - O_2 -$ инерт (He, Ne, Ar, CO_2) при комнатной температуре и давлении $p = 0,1 \div 0,3$ МПа. В [5—9] измерены нижние концентрационные пределы (НКПР) гремучей смеси ($2H_2 + O_2$) в инертных газах (H_2O , N_2 , He и т.д.) при $T = 290 \div 470$ К и $p = 0,1 \div 2,0$ МПа.

Зависимость S_u от концентрации водорода при давлениях и температурах, близких к нормальным, достаточно хорошо изучена [10]. В работах [11, 12] приведены данные по зависимостям $S_u(T)$, $S_u(p)$ и от концентрации водяного пара. Показано, что для всех исследованных составов в условиях экспериментов (коэффициент избытка горючего от 0,8 до 1,3, $T = 290 \div 500$ К, $p = 0,05 \div 2,5$ МПа) температурный и барический показатели нормальной скорости горения положительны. В то же время данные экспериментальных и теоретических работ [7, 13—16] свидетельствуют, что величина и знак барического показателя зависят от состава смеси и давления.

Настоящая работа посвящена экспериментальному определению КПР и нормальной скорости горения смесей водород — кислород — разбавитель при повышенных давлениях (до 4,0 МПа) и температурах (до 523 К). При определении КПР основное внимание уделено нижним ветвям кривых флегматизации, что обусловлено большой значимостью этих данных для обеспечения взрывобезопасности технологических процессов с участием водорода.

© Ю.Н. Шебеко, С.Г. Цариченко, А.В. Трунев, А.Я. Корольченко, А.Ю. Каплин, 1994.

Концентрационные пределы распространения пламени определяли на экспериментальной установке «Пар» с реакционным сосудом в виде вертикального цилиндра объемом 50 дм³ (диаметр 300, высота 800 мм) [7, 8]. Выбор объема и геометрии сосуда основан на результатах экспериментальных и теоретических исследований влияния естественной конвекции на предельные условия распространения пламени [17, 18]. Как показано в [18], данные по пределам, полученные на установке с указанными выше размерами, соответствуют предельным условиям распространения пламени в большом объеме. Стенки реакционного сосуда нагревались четырьмя независимыми группами тэнов. Равномерность прогрева контролировали 12 термометрами, расположенными на стенках с внешней стороны. Максимальная разница температур по поверхности реакционного сосуда не превышала 10 К.

Горючие смеси готовили по парциальным давлениям в предварительно отвакуумированном до остаточного давления не выше 0,15 кПа реакционном сосуде. При этом водяной пар подавали из специального парогенератора: металлический сосуд с дополнительным обогревом, снабженный манометром. Перед началом экспериментов в холодный парогенератор заливали дистиллированную воду, затем его заглушали и нагревали до температуры, обеспечивающей требуемое давление водяного пара.

Для получения однородной смеси предусмотрена одновременная подача пара и газовых компонентов в нижнюю и верхнюю части реакционного сосуда. После задания всех компонентов включали конвективный перемешиватель, установленный в нижней части сосуда вблизи его днища. Смесь перемешивали и нагревали 5 мин, затем выдерживали до ее зажигания 15 мин при отключенном нагреве. Относительная погрешность задания парциальных давлений компонентов не превышала 1 %.

Смесь зажигали пережиганием нихромовой проволоки диаметром 0,15 и длиной 40 мм при подаче на нее напряжения 42 В. По данным [5, 6, 19], такой источник обеспечивает надежное зажигание парогазовых смесей, в том числе и околопредельного состава, при повышенных давлениях. Распространение пламени регистрировали с помощью датчика давления «Сапфир-22» с постоянной времени 10⁻³ с и двух термопар, расположенных вблизи верхнего днища реакционного сосуда. Принималось, что пламя распространяется по парогазовой смеси, если повышение давления было не ниже 0,01 МПа (как и в [5, 6]) или сигнал хотя бы одной термопары превышает 100 К. Указанная система регистрации позволяет фиксировать как пламена со сплошным фронтом (существенное повышение давления в процессе распространения пламени), так и пламена, распространяющиеся в «пузырьковом» режиме с незначительным повышением давления [20].

Значения нормальной скорости горения определяли на установке «Вариант» с термостатируемым реакционным сосудом сферической формы объемом 4,2 дм³ [7]. Горючие смеси подавали, как и на установку «Пар» (по парциальным давлениям с предварительным вакуумированием реакционного сосуда до остаточного давления не выше 0,15 кПа). Зажигание происходило в центре сферы в результате пережигания нихромовой проволоки. Давление в сосуде в процессе взрыва регистрировали датчиком «Сапфир-22» с постоянной времени ~10⁻³ с. Величину S_u вычисляли по осциллограммам давление — время с использованием методики работы [21]. Суть ее состоит в следующем. Предполагается, что зависимость S_u от безразмерного давления $\pi = p/p_0$ (p_0 — начальное давление) в процессе адиабатического взрыва описывается соотношением

$$S_u = S_{u0} \pi^\epsilon, \quad (1)$$

где S_{u0} — нормальная скорость горения при начальных давлении p_0 и температуре T_0 ; $\epsilon = m + n - m/\gamma_u$ — обобщенный термокинетический показатель; m , n — температурный и барический показатели нормальной скорости горения; γ_u — показатель адиабаты свежей смеси.

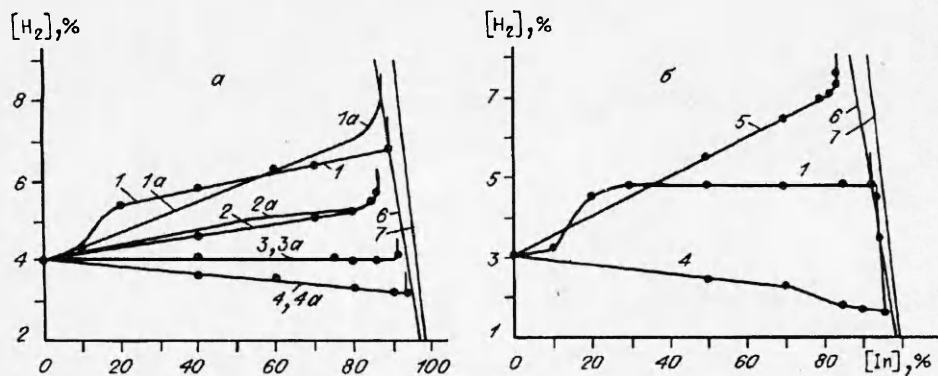


Рис. 1. Концентрационные пределы распространения пламени в смесях водород — кислород — инертный разбавитель (In) при $p_0 = 0,1$ МПа и $T = 293$ (а) и 423 К (б).
 1 — $H_2 - He - O_2$; 1а — $H_2 - He - O_2$ [2]; 2 — $H_2 - CO_2 - O_2$; 2а — $H_2 - CO_2 - O_2$ [2]; 3 — $H_2 - N_2 - O_2$; 3а — $H_2 - N_2 - O_2$ [1]; 4 — $H_2 - Ar - O_2$; 4а — $H_2 - Ar - O_2$ [2]; 5 — $H_2 - H_2O - O_2$; 6 — прямая, отвечающая смесям стехиометрического состава; 7 — прямая, ограничивающая область физически существующих смесей.

Путем многократного численного моделирования процесса сгорания газа в замкнутом сферическом сосуде ищутся параметры S_{ui} и ϵ , при которых наблюдается наилучшее совпадение расчета и эксперимента на участке кривой давление — время, на котором влияние источника зажигания (начальная часть кривой) и теплотеря в стенке (часть кривой вблизи максимального давления взрыва) незначительны. Далее, используя найденные оптимальные величины S_{ui} и ϵ , зависимость между температурой и давлением в процессе адиабатического взрыва и соотношение (1), находится зависимость $S_u(p)$ при различных T . Более подробно процедура определения S_u описана в работе [21] и стандарте ГОСТ 12.1.044-89. Относительная погрешность определения всех величин не превышает 10 %, за исключением S_u , для которой она составляет ~20 %.

На рис. 1, 2 представлены результаты измерения КПР для изученных водородсодержащих смесей. На рис. 1 видно, что наиболее эффективны флегматизаторы с большей молярной теплоемкостью (CO_2 , H_2O). Если молярная теплоемкость флегматизатора c_{ii} выше, чем у окислителя (в случае CO_2 и H_2O), наблюдается рост НКПР с увеличением содержания флегматизатора. В случае близости их значений (N_2) НКПР остается приблизительно постоянным вплоть до «мыса» кривой флегматизации, называемого в литературе [22] точкой флегматизации. Когда значение c_{ii} флегматизатора ниже (Ar), наблюдается снижение НКПР с увеличением добавок флегматизатора. Указанные факты хорошо согласуются с тепловой теорией распространения пламени [23].

Отметим, что для всех рассмотренных добавок точкам флегматизации соответствуют бедные смеси. Этот результат качественно согласуется с данными [1—3], и его теоретическая интерпретация дана в работе [2] на основе представлений о «пузырьковом» режиме сгорания бедных водородсодержащих смесей с объемной концентрацией H_2 до 8 %. Результаты измерений при $T_0 = 293$ К и $p_0 = 0,1$ МПа удовлетворительно согласуются с имеющимися в литературе [1, 2] (рис. 1, а).

С ростом давления при фиксированной температуре концентрационная область распространения пламени для смесей $H_2 - O_2 - N_2$ и $H_2 - O_2 - He$ сужается, а с повышением T_0 при фиксированном p_0 — расширяется (см. рис. 2). Природа влияния температуры — повышение начальной энтальпии горючей смеси. Сужение концентрационной области распространения пламени с ростом p_0 обусловлено, по-видимому, снижением относительных концентраций активных центров за счет увеличения роли тримолекулярных реакций рекомбинации. Пересечение нижних ветвей кривых флегматизации

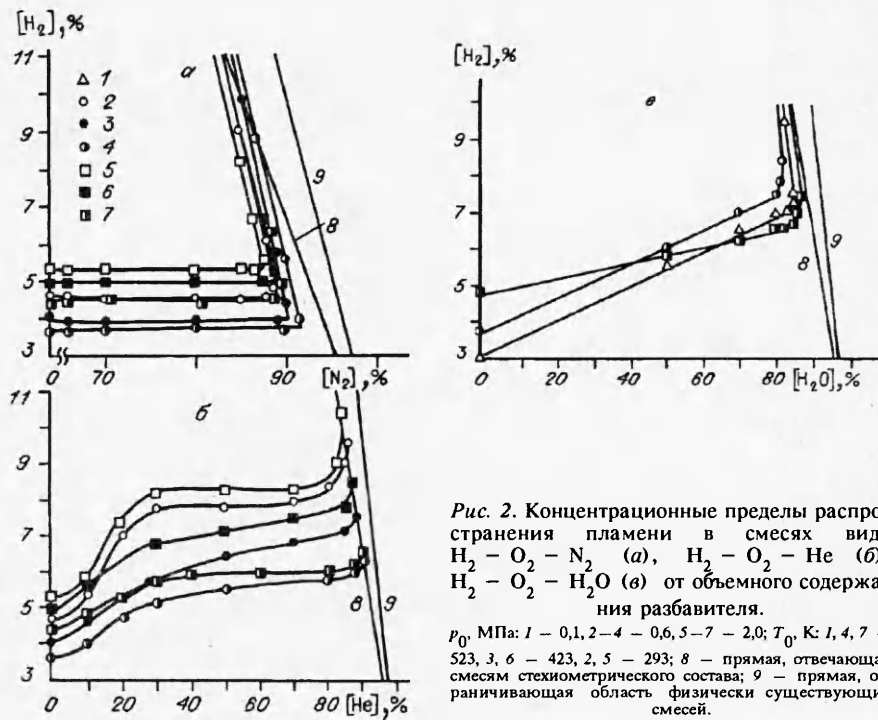


Рис. 2. Концентрационные пределы распространения пламени в смесях вида $H_2 - O_2 - N_2$ (а), $H_2 - O_2 - He$ (б), $H_2 - O_2 - H_2O$ (в) от объемного содержания разбавителя.
 p_0 , МПа: 1 - 0,1, 2-4 - 0,6, 5-7 - 2,0; T_0 , К: 1, 4, 7 - 523, 3, 6 - 423, 2, 5 - 293; 8 - прямая, отвечающая смесям стехиометрического состава; 9 - прямая, ограничивающая область физически существующих смесей.

для различных p_0 в случае смесей $H_2 - O_2 - H_2O$ (рис. 2, в) качественно согласуется с результатами [5, 6] по аномальному воздействию водяного пара на величину НКПР гремучей смеси в водяном паре при высоких давлениях по сравнению с другими изученными здесь флегматизаторами. Вероятно, данный эффект обусловлен неидеальностью водяного пара (образование его димеров, тримеров и т.д.).

Обращает на себя внимание несколько необычный характер поведения нижней ветви кривой флегматизации в случае разбавления гелием. При малых концентрациях этого разбавителя происходит быстрый рост содержания горючего на нижнем концентрационном пределе, затем скорость роста концентрации горючего на нижнем пределе падает. Данный эффект наблюдается при $p_0 = 0,1$ МПа и выше.

Для качественного объяснения указанной закономерности примем во внимание, что коэффициент диффузии гелия существенно выше коэффициентов диффузии других исследованных в данной работе флегматизаторов и близок к коэффициенту диффузии водорода [2]. Учтем также, что горение бедных водородсодержащих смесей с $[H_2] = 8 \%$ при комнатной температуре и атмосферном давлении (при других параметрах состояния эта концентрация может быть иной) происходит в так называемом «пузырьковом» режиме. Характерная его особенность — отсутствие сплошного фронта пламени. Пламя распространяется в виде множества конвективно всплывающих очагов («пузырьков» [20]). За счет более высокого коэффициента диффузии водорода по сравнению с кислородом и другими разбавителями (кроме гелия) происходит избирательная (в соответствии с терминологией [20]) диффузия H_2 во фронт пламени, в результате чего в узком фронте поддерживается минимально необходимая для существования очага температура горения, которая выше адиабатической для заданной объемной концентрации водорода, не превышающей 8%. Более подробно подобный режим горения рассмотрен в [23].

Если в горючей смеси присутствует He, за счет более высокой температуры во фронте пламени существует градиент концентрации He между фронтом и свежей смесью. В результате с учетом высокого коэффициента

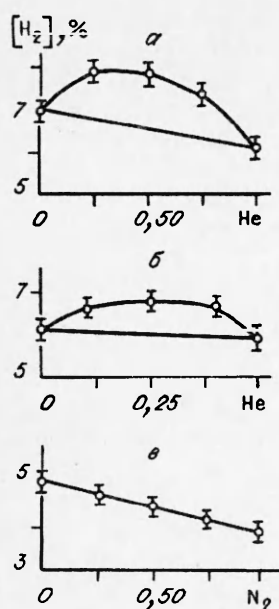


Рис. 3. Зависимость НКПР водорода от соотношения компонентов составного флегматизатора. По оси абсцисс отложена мольная доля He и N_2 в составном флегматизаторе.
 а - $H_2 - O_2 - (He + H_2O)$, $p_0 = 0,6$ МПа, $T_0 = 523$ К, $[In] = 75$ %; б - $H_2 - O_2 - (He + CO_2)$, $p_0 = 0,1$ МПа, $T_0 = 293$ К, $[In] = 80$ %; в - $H_2 - \text{воздух} - (N_2 + CO_2)$, $p_0 = 0,1$ МПа, $T_0 = 343$ К, $[In] = 50$ %.

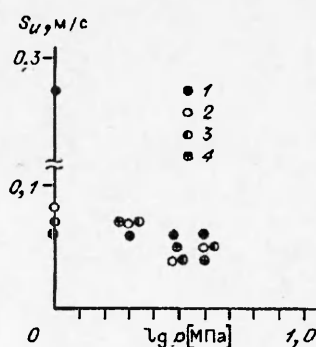


Рис. 4. Зависимость $S_u(p)$ смесей $H_2 + O_2 + N_2$:
 1 - $H_2(10\%) + O_2(50\%) + N_2(40\%)$; 2 - $H_2(13\%) + O_2(7\%) + N_2(80\%)$; 3 - $H_2(10\%) + O_2(10\%) + N_2(80\%)$; 4 - $H_2(10\%) + O_2(30\%) + N_2(60\%)$.

диффузии He происходит избирательная (по отношению к кислороду) диффузия He во фронт пламени (термодиффузионный механизм). При этом реализуется относительно более высокая (по сравнению с влиянием только мольной теплоемкости) флегматизирующая способность He, что и находит отражение в нелинейном характере зависимости концентрации водорода на нижнем пределе от концентрации разбавителя. Указанный эффект имеет место до определенной концентрации водорода (8 % при $T_0 = 293$ К и $p_0 = 0,1$ МПа, при более высоких температурах эта концентрация ниже), при которой «пузырьковый» режим горения сменяется режимом со сплошным фронтом пламени. Затем флегматизирующая эффективность He определяется в основном его мольной теплоемкостью, и нижняя ветвь кривой флегматизации выполаживается. В работе [2], где эксперименты проводили в стеклянной трубе диаметром 50 мм, описанный эффект выражен весьма слабо, по-видимому, из-за малого диаметра реакционного сосуда.

Учитывая несколько необычный характер влияния гелия на НКПР водорода, можно ожидать определенных особенностей для составных флегматизаторов, одним из компонентов которых является гелий. Для обнаружения этих особенностей выполнены эксперименты по определению НКПР водорода при наличии в горючей смеси составных флегматизаторов He — H_2O , He — CO_2 , N_2 — CO_2 (рис. 3). Для сравнения на рис. 3 приведены зависимости НКПР от состава флегматизатора, следующие из их чисто теплового влияния (в соответствии с термодинамическими расчетами в предположении постоянства адиабатической температуры горения на нижнем пределе [2]). Видно, что для составных флегматизаторов, содержащих He, наблюдается эффект синергизма, обусловленный, по нашему мнению, описанным выше механизмом. В случае N_2 — CO_2 (рис. 3, в) отклонений от термодинамического расчета в пределах ошибки эксперимента не отмечено. В литературе имеются данные об эффекте синергизма для разбавителей, в состав которых входят бромсодержащие углеводороды ($C_2F_4Br_2$, CF_3Br) [24]. Сведений об эффекте синергизма при добавлении в смесь горючего газа с окислителем инертных разбавителей в литературе не обнаружено.

На рис. 4 представлены результаты определения зависимости нормальной скорости горения смесей $H_2 - O_2 - N_2$ различного состава от давления при $T = 20^\circ C$. Обращают на себя внимание два обстоятельства. Во-первых, барический показатель нормальной скорости горения отрицателен, а для околостехиометрических смесей положителен [12]. Отрицательность барического показателя для околораздельных водородсодержащих смесей отмечена также в работах [13—16]. Во-вторых, величина S_u при $p = 2,0$ МПа довольно слабо зависит от p . Этот результат также качественно согласуется с экспериментальными данными [13].

ЛИТЕРАТУРА

1. Coward H.F., Jones G.W. Flammability limits of gases and vapours // Bulletin 503. Bureau of Mines. — Washington, 1952.
2. Шебеко Ю.Н., Ильин А.Б., Иванов А.В. Экспериментальное исследование концентрационных пределов воспламенения в смесях вида водород — кислород — разбавитель // ЖФХ. — 1984. — 58, № 4. — С. 862—865.
3. Kumar R.K. Flammability limits of hydrogen-oxygen-diluent mixtures // J. Fire Science. — 1985. — 3, N 4. — P. 245—262.
4. Holmstedt G.S. The upper limit of flammability of hydrogen in air, oxygen and oxygen — inert mixtures at elevated pressures // Combustion and Flame. — 1971. — 17, N 4. — P. 295—301.
5. Kogarko S.M., Lyamin A.G., Popov O.E. et al. Determination of flame propagation limits in Stoichiometric oxyhydrogen mixtures with steam // Hydrogen behaviour and control and related containment loading aspects. Proceedings of a specialists meeting organized by the International Atomic Energy Agency and held in Suzdal. USSR, 19—23 September 1983 — Vienna: IAEA, 1984. — P. 37—41.
6. Когарко С.М., Кушарин А.Ю., Лямин А.Г. и др. Пределы распространения пламени в смесях гремучего газа с различными разбавителями при повышенных давлениях // Взрыво-безопасность технологических процессов, пожаро- и взрывозащита оборудования и зданий. — Черкассы: НИИТЭХИМ, 1985. — С. 7—8.
7. Шебеко Ю.Н., Корольченко А.Я., Цариченко С.Г. и др. Влияние начального давления и температуры на характеристики горения водородсодержащих смесей // ФГВ. — 1989. — 25, № 3. — С. 32—36.
8. Цариченко С.Г., Серкин М.А., Трунев А.В. Влияние давления и температуры на концентрационные пределы распространения пламени в водородсодержащих смесях // Пожаро-взрывоопасность веществ и материалов, изделий и технологических процессов. — М.: ВНИИПО, 1990. — С. 122—124.
9. Цариченко С.Г., Шебеко Ю.Н., Трунев А.В. и др. Определение концентрационных пределов распространения пламени в водородсодержащих смесях с флегматизаторами // Хим. пром-сть. — 1991. — № 10. — С. 590—592.
10. Camp A.L., Cummings J.C., Sherman M.P. et al. Light Water Reactor Hydrogen Manual. NUREG/CR — 2726. SAND 82—1137. — Albuquerque: Sandia National Laboratory, 1983.
11. Liu D.D.S., Mac Farlane R. Laminar burning velocities of hydrogen-air and hydrogen-air-steam flames // Combust. Flame. — 1983. — 49, N 1/3. — P. 59—71.
12. Iijima T., Takeno T. Effects of temperature and pressure on burning velocity // Ibid. — 1986. — 65, N 1. — P. 35—43.
13. Бабкин В.С., Вьюн А.В. Ингибирование водородвоздушных пламен при высоких давлениях // ФГВ. — 1981. — 17, № 5. — С. 8—13.
14. Шебеко Ю.Н., Цариченко С.Г., Корольченко А.Я. и др. Характеристики горения смесей водород — метан — воздух в замкнутом сосуде // Там же. — 1991. — 27, № 6. — С. 52—56.
15. Warnatz J. Concentration-, pressure and temperature dependence of the flame velocity in hydrogen-oxygen-nitrogen mixtures // Combust. Sci. Technol. — 1981. — 26, N 3/4. — P. 203—213.
16. Behrendt F., Warnatz J. The dependence of flame propagation in $H_2 - O_2 - N_2$ mixtures on temperature, pressure and initial composition // Int. J. Hydrogen Energy. — 1985. — 10, N 11. — P. 749—755.
17. Бабкин В.С., Замашиков В.В., Бадалян А.М. и др. Влияние диаметра трубы на пределы распространения гомогенных газовых пламен // ФГВ. — 1982. — 18, № 2. — С. 44—52.
18. Кудрявцев Е.А., Кривулин В.Н., Баратов А.Н. и др. Новая установка для определения пределов воспламенения // Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. — М.: ВНИИПО, 1982. — С. 98—101.
19. Янговский С.А., Черняк М.В. Концентрационная область взрываемости водородо-кислородных смесей при давлениях выше атмосферного // ЖФХ. — 1966. — 40, № 11. — С. 2899—2901.
20. Furno A.L., Cook E.V., Kuchta J.M. et al. Some observations on near — limit flames // 13th Symp. (Internat.) on Combustion. — Pittsburgh: The Combustion Institute, 1971. — P. 593—599.
21. Мольков В.В., Бухаров В.Н., Бабкин В.С. и др. Определение нормальной скорости пламени методом обратной задачи в бомбе постоянного объема // Пожарная профилактика. — М.: ВНИИПО, 1986. — С. 37—48.
22. Монахов В.Т. Методы исследований пожарной опасности веществ. — М.: Химия, 1979.

23. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б. и др. Математическая теория горения и взрыва. — М.: Наука, 1980.
24. Баратов А.Н. Новые средства пожаротушения // Ж. ВХО им. Д.И. Менделеева. — 1976. — 21, № 4. — С. 369—379.

143900, г. Балашиха, 6
ВНИИПО

Поступила в редакцию 18/VI 1992,
после доработки — 4/VIII 1993

УДК 536.24 + 614.841

Г.Н. Исаков, В.В. Несмелов

О НЕКОТОРЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА ВО ВСПУЧИВАЮЩИХСЯ ОГНЕЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Описана новая экспериментальная методика, позволяющая изучать закономерности тепло-массопереноса во вспучивающихся материалах. Для огнезащитного состава на основе хлорсульфированного полиэтилена и терморасширяющегося графита получены зависимости кратности вспучивания, потери массы и плотности от температуры отжига и скорости нагрева. Предложен критерий эффективности, позволяющий проводить сравнительный анализ теплозащитных свойств различных покрытий при огневых испытаниях.

Один из рациональных путей решения проблемы повышения огнестойкости конструкций и пожаро- и взрывобезопасности промышленных объектов — применение вспучивающихся покрытий [1—3]. Механизм их действия характеризуется способностью увеличиваться по толщине под воздействием высоких температур в десятки и более раз [1] за счет образования пеноподобного слоя с малой плотностью и теплопроводностью, в результате чего проникновение тепла в глубь материала существенно снижается.

Наибольшим распространением среди отечественных вспучивающихся покрытий пользуются составы типа ВПМ-2 [1—3] на основе смолы ММФ-50 и дициандиамида с добавками аммофоса или факкора, мелема, асбеста со стекловолокном [1, 2]. В последнее время в составах типа ВПМ-2 [3] стали использовать терморасширяющиеся графиты (ТРГ), в частности бисульфиты [2], которые значительно улучшают теплозащитные свойства покрытий за счет роста кратности вспучивания. Механизм терморасширения ТРГ основан на способности увеличиваться в объеме при прокаливании в диапазоне температур ~ 800 — 1100 К за счет раздвижки пакетов плоскостей газами пиролиза [2], что в итоге приводит к существенному росту пористости. По-видимому, этот механизм аналогичен порообразованию в пеноматериалах [4], когда вспенивание гетерогенной смеси осуществляется газами разлагающегося порообразователя.

В данной работе определены основные характеристики тепло- и массопереноса и вспучивания огнезащитного состава [5, 6] на основе хлорсульфированного полиэтилена и ТРГ (условно обозначен СГК-1), а также проанализированы теплозащитные свойства в сравнении со стандартным покрытием ВПМ-2 [3].

Методика проведения экспериментов

Схема эксперимента показана на рис. 1. Она развивает методологию проведения тепловых испытаний полимеров и покрытий, предложенную в [7]. Исследуемый образец 5 в виде таблетки из огнезащитного материала высотой $h_n \approx 2 \div 6 \cdot 10^{-3}$ м помещается в трубку 2 из нержавеющей стали с внутренним диаметром $2R_y \approx 7 \cdot 10^{-3}$ м и длиной $\approx 5 \cdot 10^{-2}$ м, а затем разогревается в потоке нагретого газа (азота). При этом торцевая часть