

УДК 544.452.12.5; 544.454.032

КОНЦЕНТРАЦИОННЫЕ ПРЕДЕЛЫ ПЛАМЕНИ В МЕТАНОВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ С УГЛЕВОДОРОДНЫМИ ДОБАВКАМИ**В.А.Левин¹, Н.Е.Афони́на¹, В.Г.Громов¹, И.С.Мануйлович¹,
В.В.Марков², Г.Д.Смехов¹, А.Н.Хмелевский¹**¹НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, 119192 Москва, Мичуринский пр-т 1, Россия²Математический институт им В.А. Стеклова РАН, 119991 Москва, ул. Губкина 8, Россия**Аннотация**

Приведены данные экспериментального исследования условий горения метановоздушных смесей с добавками водорода, ацетилена и бутана в режимах, близких к критическим по концентрациям горючих компонентов смеси. Экспериментальные исследования воспламенения и горения проводились в сферической камере сгорания из нержавеющей стали, имеющей внутренний диаметр 286 мм.

Все опыты проводились при начальном атмосферном давлении, комнатной температуре и нормальной влажности воздуха. В экспериментах использовался метан высокой чистоты (99.93 %), содержащий не более 0.07 % примесей азота. Горение инициировалось в центре сферы взрывом проволоочки из нихрома при разряде конденсаторной батареи. Управление разрядом осуществлялось с помощью игнитронного разрядника. Энергия батареи при необходимости могла изменяться от 0.1 до 100 Дж. Основным измеряемым параметром являлось давление, регистрируемое в процессе распространения пламени в сферической камере сгорания. В ходе каждого опыта контролировались также следующие параметры: величина энергии, запасенной на конденсаторной батарее, разряд которой инициировал горение смеси; форма и длительность импульса тока, вызывающего взрыв нихромовой проволоочки по записи сигнала с пояса Роговского; давление в остывших в КС после завершения процесса горения продуктах. В результате проведенного исследования определены нижние концентрационные пределы распространения пламени для бинарных топлив метан-водород, метан-ацетилен, и трехкомпонентного топлива метан-ацетилен-бутан. при изменении концентраций компонентов в пределах: $0 < [\text{CH}_4] \% < 5.0$; $0 < [\text{H}_2] \% < 4.0$; $0 < [\text{C}_2\text{H}_2] \% < 2.2$; $0 < [\text{C}_4\text{H}_{10}] \% < 1.1$. Полученные в работе значения нижних концентрационных пределов распространения пламени в исследованных составах отличались от значений, предсказываемых правилом А. Ле-Шателье, в пределах 16 %. Результаты исследования могут использоваться как для оценки условий взрывобезопасности при работе с указанными горючими смесями, так и для верификации и оптимизации оригинальных расчетных моделей процесса распространения взрывных волн и волн детонации в многокомпонентных промышленных и рудничных пылегазовых смесях.

Ключевые слова: метано-воздушная смесь, углеводородные добавки, концентрационный предел, правило А. Ле-Шателье.

Введение

Взрывоопасность работ по добыче и переработке угля, нефти и газа обусловлена рядом факторов, в числе которых одним из определяющих является превышение концентрационных пределов распространения пламени (КПР). При этом основным горючим компонентом, содержащимся во взрывоопасной смеси, является метан, а в угольных шахтах, кроме того, еще и угольная пыль, взвешенная в воздухе и лежащая на твердых внутренних поверхностях шахты. Содержание других дополнительных горючих компонентов может изменяться в зависимости от месторождения [1].

Наличие тяжелых углеводородов (УВ) приводит к расширению диапазона взрывоопасных концентраций метановоздушной смеси. Если КПР для ряда практически интересных трехкомпонентных горючих смесей (горючее - окислитель - инертный разбавитель) в настоящее время достаточно хорошо изучены, то для многокомпонентных горючих смесей, представляющих особый практический интерес для определения условий взрывобезопасности, данные по КПР достаточно скудны или вообще отсутствуют [2,3].

В работе представлены результаты экспериментального исследования КПР в метановоздушных смесях с добавками водорода, ацетилена и бутана, которые могут содержаться в составе рудничного газа [1,4,5]. Исследование условий горения в режимах, близких к критическим по концентрациям горючих компонен-

тов смеси, представляет особый интерес при наличии пылевых добавок. Последние могут заметно расширять границы области воспламенения и изменять условия горения в соответствующей горючей смеси. Полученные результаты могут использоваться как для оценки условий взрывобезопасности при работе с указанными горючими смесями, так и для верификации и оптимизации оригинальных расчетных моделей процесса распространения взрывных волн и волн детонации в многокомпонентных промышленных и рудничных пылегазовых смесях.

Детали эксперимента

Экспериментальные исследования горения метановоздушных смесей с УВ добавками проводились в сферической камере сгорания (КС) из нержавеющей стали, имеющей внутренний диаметр 286 мм. Горение инициировалось в центре сферы взрывом проволоочки из нихрома при разряде конденсаторной батареи ёмкостью 2 мкф за время около 1 мкс. Управление разрядом осуществлялось с помощью игнитронного разрядника. Энергия батареи при необходимости могла изменяться от 0.1 до 100 Дж. В экспериментах энергия инициирования горения составляла порядка нескольких

джоулей при мощности источника порядка 10 Мвт/см³.

Электронные блоки зажигания и синхронизации позволяли производить инициирование горения топливной смеси и синхронный запуск регистрирующей аппаратуры. Первичными средствами измерений являлись как пьезоэлектрические датчики давлений с временем разрешения порядка 2 мкс, так и тензометрические датчики, имеющие время разрешения порядка 1 мс. Датчики устанавливались заподлицо в стенке сферической КС в экваториальной плоскости в четырех диаметрально противоположных точках, расположенных на диаметрах, пересекающихся под углом 90°. Наличие нескольких датчиков позволяло контролировать наличие (отсутствие) осевой симметрии при распространении пламени. В ряде опытов вблизи датчика давления устанавливался датчик теплового потока, который фиксировал градиент температуры на поверхности сферы. Это давало возможность регистрировать момент прихода теплового фронта пламени к поверхности датчика давления. Сигналы с датчиков проходили через согласующие усилители и записывались цифровыми осциллографами.

Типичные осциллограммы сигналов изменения давления представлены на рисунке 1 для пламени в смеси ацетилена (6.6 % по объему) в воздухе.

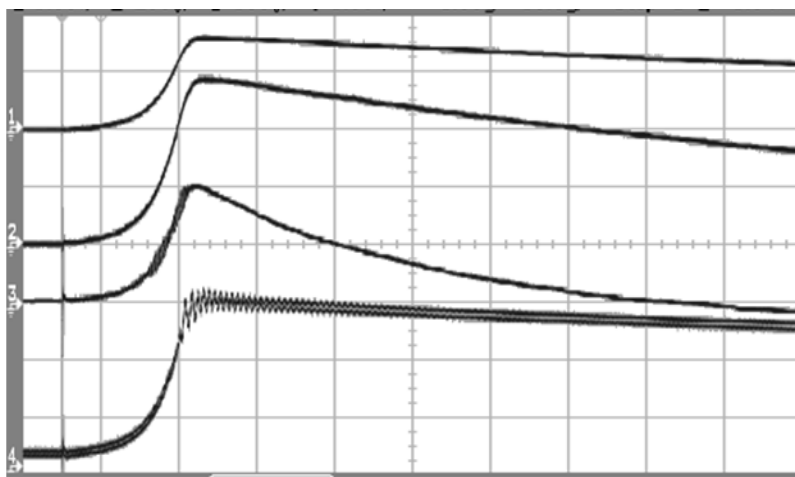


Рис. 1 - Типичные осциллограммы сигналов с пьезоэлектрических (1-3) и тензометрического (4) датчиков давления при распространении пламени в 6.6 % (по объему) смеси ацетилена в воздухе. Максимальное давление составляет 8 атм, начальное – 1 атм. Скорость развёртки 10 мс на деление

Лучи № 1 - 4 – сигналы с пьезоэлектрических (разных конструкций и размеров № 1 – 3) и тензометрического (№ 4) датчиков давления. Момент инициирования горения смеси в реакторе зарегистрирован на лучах № 3 и 4

вертикальным всплеском сигнала наводки от кратковременного высоковольтного импульса, подаваемого на электровзрыватель, и помечен дополнительной вертикальной прямой на сетке экрана осциллографа. После этого давление в

камере сгорания плавно (без явно выраженного излома) возрастает по времени и достигает максимума в момент достижения пламенем сферических стенок. Такое поведение давления характерно для горения составов, далеких от предельных по концентрациям горючего. В данном опыте давление достигает максимального значения одновременно на всех четырех направлениях (датчиках) распространения пламени. Это свидетельствует об осевой симметрии фронта пламени. Видно также, что разные датчики по-разному реагируют на значительный тепловой прогрев, наступающий в момент появления максимального давления, когда тепловой фронт достигает поверхности датчика и начинает нагревать его корпус. Сигналы с датчиков № 1 и 4 (верхний и нижний лучи соответственно) уменьшаются значительно медленнее, чем сигналы с датчиков № 2 и 3. Это происходит из-за заметного уменьшения чувствительности датчиков № 2 и 3 при прогреве их корпусов. Напротив, датчики № 1 и 4 имели специальную поверхность (как в № 1) или особую конструкцию и схему включения (как в № 4), которые обеспечивали неизменность их чувствительности при прогреве корпуса. Ввиду указанных особенностей изменения чувствительности различных датчиков, в опытах с многокомпонентными смесями использовались только датчики со стабильной по прогреву корпуса чувствительностью. Это позволяло отличить излом на временной развертке сигнала давления, свидетельствующий об изменении скорости роста давления при распространении пламени в КС, от излома, не связанного с изменением давления, который возникает из-за резкого уменьшения чувствительности датчика давления при прогреве его корпуса.

Считалось, что пламя сформировалось, если начальное давления в смеси возрастало на 5 % и более. Повышение давления в КС фиксировалось по изменению сигналов с датчиков давления № 1 – 4 после подачи импульса, инициирующего горение. Опыты по определению КПП пламени проводились таким образом, что при заданном составе смеси последовательно увеличивалась (с определенным шагом) концентрация исследуемой горючей добавки, пока смесь не загоралась. По полученным данным КПП рассчитывался как среднее значение между ближайшими концентрациями, соответствующими затуханию и распространению пламени.

Шаг изменения концентрации исследуемой добавки выбирался исходя из предполагаемой степени ее влияния на КПП пламени. Это влияние определяется значением нижнего концентрационного предела распространения (НКПР) горючей добавки в воздухе. Поскольку НКПР для разных добавок разные, то и соответствующие абсолютные значения шагов изменения исследованных концентраций добавок различались. В целом шаг изменения по концентрации исследуемой добавки составлял (для разных исследованных добавок) примерно 6-13 % от величины НКПР этой добавки в воздухе.

Основным измеряемым параметром являлось давление, регистрируемое в процессе распространения пламени в сферической КС. В ходе каждого опыта контролировались также следующие параметры:

1. величина энергии, запасенной на конденсаторной батарее, разряд которой инициировал горение смеси;

2. форма и длительность импульса тока электровзрыва нихромовой проволоки по записи сигнала с пояса Роговского;

3. давление в остывших в КС после завершения процесса горения продуктах.

Наполнение и откачка КС осуществлялась через штуцер, соединённый с вакуумной магистралью и системой газового обеспечения. Все опыты проводились при начальном атмосферном давлении, комнатной температуре и нормальной влажности воздуха. В экспериментах использовался метан высокой чистоты (99.93 %), содержащий не более 0.07 % примесей азота. Абсолютная точность приготовления компонентов смеси в исследуемом составе составляла по объемной концентрации 0.04 %.

Большинство опытов разных авторов по определению КПП проводилось в камерах сгорания различной геометрии и объема как замкнутых, так и открытых с одного торца [2]. К сожалению, оказывается, что НКПР, определенные с помощью различных методик, могут отличаться [2, 6-7]. Анализ соответствия основных условий проведения измерений [2,6], выполнение которых обеспечивает минимальное влияние аппаратных условий на результаты определения НКПР в горючих смесях применительно к методике настоящей работы, показал, что она в большинстве пунктов им соответствует. Это подтвердили опыты по определению НКПР в метановоздушных смесях, в которых полученный НКПР (примерно 5 %

метана в воздухе) совпал с известными данными [8-10].

Результаты и обсуждение

НКПР смеси $\text{CH}_4 - \text{H}_2 - \text{воздух}$

Исследование НКПР двухкомпонентной горючей смеси $\text{CH}_4 - \text{H}_2 - \text{Воздух}$ представляет практический интерес, поскольку водород является одной из важных горючих добавок к метану в составе рудничного газа. Для определения КПР в подобных смесях А. Ле-Шателье предложил эмпирическое правило, связывающее НКПР отдельных горючих газов с НКПР их смеси. Это правило первоначально [11, 12], ограничивалось им применением к двухкомпонентным смесям $\text{H}_2 - \text{CO} - \text{Воздух}$ и $\text{C}_2\text{H}_2 - \text{CO} - \text{Воздух}$. Впоследствии многочисленные последователи (библиография представлена [2]) его пионерских работ расширили области применения указанной формулы для других многокомпонентных смесей горючих. Х. Ковард с соавторами [13] обобщил правило А. Ле-Шателье на случай произвольной многокомпонентной смеси горючих газов, записав его в виде:

$$S \equiv \sum_i^n \frac{[i]}{L_i} = 1, \quad (1)$$

где $[i]$ – содержание (объемные %) в предельной по концентрации смеси i -го горючего,

L_i – НКПР этого горючего в воздухе, n – число горючих компонентов в смеси.

В формуле (1) величина S – сумма А. Ле-Шателье. Используя для CH_4 и H_2 значения НКПР из [9] ($L_{\text{CH}_4} = 5\%$, $L_{\text{H}_2} = 4\%$) запишем для смеси ($\text{CH}_4 - \text{H}_2 - \text{Воздух}$) формулу А. Ле-Шателье (1), определяющую $[\text{CH}_4]$ и $[\text{H}_2]$ в предельной горючей смеси, в виде:

$$\left(\frac{[\text{CH}_4]}{L_{\text{CH}_4}} + \frac{[\text{H}_2]}{L_{\text{H}_2}} \right) = \left(\frac{[\text{CH}_4]}{5} + \frac{[\text{H}_2]}{4} \right) = 1. \quad (2)$$

В прямоугольных координатах ($[\text{H}_2]$; $[\text{CH}_4]$) уравнение (4) – каноническое уравнение прямой в отрезках, проходящей через точки с координатами (4;0) и (0;5). Эта прямая, согласно правилу А. Ле-Шателье, – нижняя граница области воспламенения смеси ($\text{CH}_4 - \text{H}_2 - \text{Воздух}$), выше ее лежит область воспламенения, ниже – область негорючих смесей.

В формуле (2) для значений НКПР смеси метана либо водорода в воздухе приняты значения равные 5 % и 4 % соответственно. В литературных источниках имеется разброс данных для значений НКПР. Например, в [2] приводится много значений НКПР метановоздушной смеси, они в основном несколько выше 5 %. Мы здесь и ниже будем использовать в формулах А. Ле-Шателье значения НКПР, которыми в России пользуются горные инженеры при прогнозировании взрывов горючих газов в аварийных пожарных зонах угольных шахт [14]. Применяемые в горном деле формулы для расчета, например, НКПР метановоздушной смеси в угольной шахте дают (при нормальной влажности воздуха и отсутствии пыли) именно 5 % значение для нижнего предела [15]. Это же значение приводят авторы работ [9-10,14-15, 17].

Интерес исследователей [13, 16] к изучению горючих свойств смеси $\text{CH}_4 - \text{H}_2 - \text{воздух}$ в начале прошлого века был инициирован работами А. Ле-Шателье. Опыты выполнялись в первом случае в 170 литровом цилиндрическом объеме (диаметром 0.3 м и длиной 1.8 метра), и трубе (диаметром 0.05 м) – во втором случае. Факт воспламенения в этих опытах фиксировался визуально. Отсутствие малоинерционных датчиков давления в то время не позволило авторам [13, 16] контролировать характер изменения давления в ходе опытов и полное время сгорания смеси. Итогом указанных работ было установление НКПР указанных смесей и возможности использования правила А. Ле-Шателье для их расчета. Результаты [13, 16] представлены на рисунке 2 точками 1 [13] и 2 [16], соответствующими НКПР смеси метана с водородом. Видно, что область воспламенения в опытах [13, 16] для концентраций водорода в смеси в пределах $1.5\% \leq [\text{H}_2] \leq 3.7\%$ ограничена снизу граничной прямой, определяемой соотношением (2). Для $[\text{H}_2] \geq 3.7\%$ или $[\text{H}_2] \leq 1.5\%$ область взрыва незначительно сужается.

Современный уровень экспериментальных исследований быстротекущих процессов при горении позволяет устранить аппаратные ограничения работ [13, 16] по исследованию характера изменения давления в ходе опыта, а также измерить времена достижения максимального давления в КС. Также представляет интерес проверить выводы [13, 16] о возможности использования правила А. Ле-Шателье для расчета НКПР с современными [9-10,14-15, 17] уточненными значениями

НКПР метана и водорода в воздухе (в соотношении (2) использовались значения НКПР для CH_4 и H_2 равные 5.6 % и 4.1 % в [13] и 5.4 % и 4.15 % в [16] соответственно).

Опыты настоящей работы проводились с составами $\text{CH}_4 - \text{H}_2 - \text{Воздух}$, представленными в Таблице № 1. Большинство из указанных составов содержало по отдельности столько CH_4 или H_2 в воздухе, что в соответствующей однокомпонентной смеси горючего в воздухе пламя (без затухания) не распространялось: $0\% \leq [\text{CH}_4] \leq 5\%$, $0\% \leq [\text{H}_2] \leq 4\%$. Опыты проводились таким образом, что при фиксированном значении объемной концентрации метана в смеси последовательно (в основном с шагом 0.5 %) увеличивалась концентрация водорода, пока в смеси не наблюдалось распространение пламени. По полученным данным рассчитывался, как среднее значение между ближайшей концентрацией, соответствующей распространению (индекс "f") и затуханию (индекс "n") пламени в смеси, по формуле:

$$[\overline{\text{H}_2}] = 0.5([\text{H}_2]^f + [\text{H}_2]^n). \quad (3)$$

Соответствующие полученным таким образом предельным концентрациям водорода (при заданной концентрации метана), значения $\bar{S}$ предельной характерной суммы А. Ле-Шателье

$$\bar{S} = \left(\frac{[\overline{\text{H}_2}]}{4} + \frac{[\text{CH}_4]}{5} \right) \quad (4)$$

приводятся в предпоследнем столбце Таблицы № 1.

Видно, что они лежат в пределах $0.99 \leq \bar{S} \leq 1.14$. Таким образом, можно заключить, что имеется 14 % соответствие пределов воспламенения смеси $\text{CH}_4 - \text{H}_2 - \text{Воздух}$, полученных в опытах (величина $\bar{S}$ в Таблице № 1), с правилом А. Ле-Шателье: согласно ему значение $\bar{S}$ должно равняться единице.

Таблица № 1 - Опыты по определению НКПР смеси $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-воздух}$

N п/п	Состав смеси, % объемные		S	$\bar{S}$	Факт. восп.
	CH4	H2			
1	0	3.5	0.875	1.05	-
2	0	3.9	0.975		-
3	0	4.5	1.125		+
4	1.0	3.0	0.95	1.138	-
5	1.0	3.5	1.075		-
6	1.0	4.0	1.2		+
7	1.0	5.0	1.45		+
8	2.0	2.2	0.95	1.0725	-
9	2.0	2.5	1.025		-
10	2.0	3.0	1.15		+
11	2.0	4.0	1.4		+
12	3.0	1.5	0.975	1.0375	-
13	3.0	2.0	1.1		+
14	3.0	2.5	1.225		+
15	3.0	3.0	1.35		+
16	4.0	0.5	0.925	0.9875	-
17	4.0	1.0	1.05		+
18	4.0	2.0	1.3		+
19	5.0	0	1.0	1.0875	-
20	5.0	0.7	1.175		+
21	6.0	0	1.2		+
22	7.0	0	1.4		+

Результаты опытов настоящей работы из Таблицы № 1 представлены на рисунке 2 в виде точек 3 и 4: светлые точки 3 соответствуют отсутствию распространения пламени, тем-

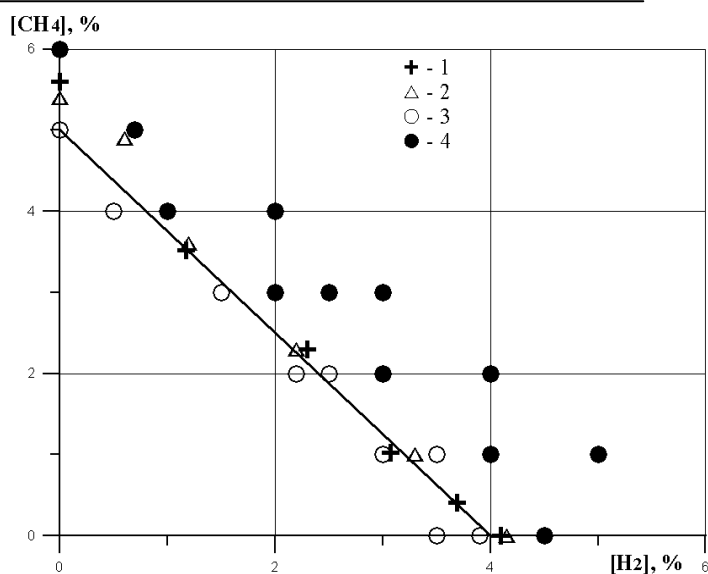
ные точки 4 отвечают области распространения пламени в исследуемой смеси. Полученные результаты с вышеуказанной точностью соответствуют области распространения пла-

мени, определяемой граничной прямой, построенной по уравнению (2).

НКПР смеси $\text{CH}_4 - \text{C}_2\text{H}_2 - \text{воздух}$

Влияние различных углеводородных добавок на горение метановоздушных смесей представляет определенный интерес с точки зрения расширения КПР в них. Ацетилен был выбран в качестве следующей исследуемой добавки из-за доступности и надежно исследованных КПР в его смесях с воздухом [8-10,18]. Кроме того, равновесные продукты сгорания

двухкомпонентных по горючим составляющим смесей $\text{CH}_4 - \text{C}_2\text{H}_2 - \text{воздух}$ могут, как показано в [19], использоваться для моделирования равновесных составов продуктов сгорания авиационного керосина в импульсных аэродинамических установках. Подготовка и сгорание смесей в подобных установках нередко происходит в реакторе постоянного объема [20-21]. Отметим также, что ацетилен может содержаться в качестве добавки к метану в шахтной атмосфере при ведении взрывных работ [4].



1,2 - предельные составы по данным [13] и [16] соответственно,
3, 4 - составы, исследованные в настоящей работе
(темные /светлые точки – распространение / затухание пламени соответственно)

Рис. 2 - Результаты исследований НКПР смеси $\text{CH}_4 - \text{H}_2 - \text{Воздух}$

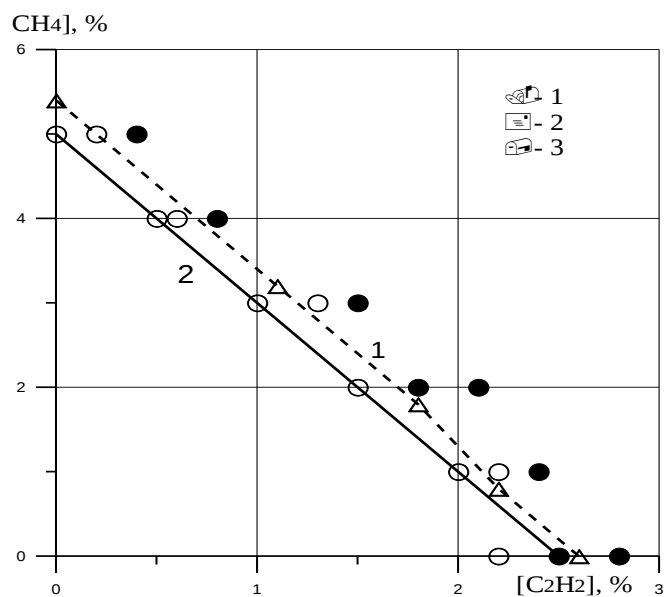
Задача исследования состояла в выявлении степени влияния добавки ацетилена в метановоздушную смесь на КПР. Основные результаты экспериментальных исследований НКПР смеси метана с ацетиленом в воздухе представлены в Таблице № 2.

В колонке S представлены значения величины S - суммы А. Ле-Шателье (1) для исследованных составов с учетом того, что $L_{\text{C}_2\text{H}_2} = 2.5\%$ [6, 8-10]. НКПР определялся по результатам экспериментов как среднее значение по концентрации добавки между ближайшими значениями, соответствующими распространению и затуханию распространения пламени в смеси, аналогично формуле (3) для метановоздушных смесей. Соответствующие предельным концентрациям ацетилена C_2H_2

значения суммы $\bar{S}$ - предельной суммы А. Ле-Шателье, приводятся в предпоследнем столбце Таблицы № 2. Видно, что они лежат в пределах (1.06 – 1.16) то есть вблизи единицы - значения, предсказываемого правилом А. Ле-Шателье. Итоговые результаты экспериментов по определению НКПР смеси $\text{CH}_4 - \text{C}_2\text{H}_2 - \text{воздух}$ приводятся на рисунке 3. Нижняя концентрационная граница области распространения пламени соответствует, согласно правилу А. Ле-Шателье, уравнению $S = 1$ для смеси $\text{CH}_4 - \text{C}_2\text{H}_2 - \text{воздух}$ и представляет собой прямую линию 2. Выше ее должна лежать область распространения пламени, ниже - область затухания. Результаты опытов соответствующих распространения пламени (или его отсутствию) обозначены темными (или светлыми) точками 2 и 3 соответственно.

Таблица № 2 - Опыты по определению НКПР смеси $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-воздух}$

N п/п	Состав смеси, % объемные		S	$\bar{S}$	Факт. восп.
	CH_4	C_2H_2			
1	0	2.6	1.04	0.94	+
2	0	2.5	1.0		+
3	0	2.2	0.88		-
4	1.0	2.4	1.2	1.14	+
5	1.0	2.2	1.08		-
6	1.0	2.0	1.0		-
7	2.0	2.1	1.24	1.06	+
8	2.0	1.8	1.12		+
9	2.0	1.5	1.0		-
10	3.0	1.8	1.32	1.16	+
11	3.0	1.5	1.2		+
12	3.0	1.3	1.12		-
13	3.0	1.0	1.0		-
14	4.0	0.8	1.12	1.08	+
15	4.0	0.6	1.04		-
16	4.0	0.5	1.0		-
17	5.0	0.4	1.16	1.12	+
18	5.0	0.2	1.08		-
19	5.0	0	1.0		-
20	6.0	0	1.2		+



1 - предельные составы по данным [16],
2, 3 - составы, исследованные в настоящей работе
(темные /светлые точки – распространение / затухание пламени соответственно)

Рис. 3 - Результаты исследований НКПР смеси ($\text{CH}_4 - \text{C}_2\text{H}_2 - \text{Воздух}$)

Там же представлены в виде точек 1 (и соответствующей усредненной по результатам опытов пунктирной кривой 1) данные нередко цитируемой работы [16]. Видно, что данные [16] лежат несколько выше граничной прямой, определяемой правилом А. Ле-Шателье, но

близки к результатам, полученным в настоящей работе.

НКПР смеси $\text{CH}_4 - \text{C}_2\text{H}_2 - \text{C}_4\text{H}_{10} - \text{воздух}$

Из углеводородов $\text{C}_2 - \text{C}_4$, встречающихся в атмосфере рудничного газа [1, 4-5], бутан

- C_4H_{10} обладает минимальным значением НКПР в воздухе и, поэтому, можно ожидать, что изменение НКПР за счет изменения его содержания в смеси $CH_4 - C_2H_2 - C_4H_{10}$ - воздух должны быть максимальными по сравнению с другими углеводородными компонентами. Согласно правилу А. Ле-Шателье НКПР смеси $CH_4 - C_2H_2 - C_4H_{10}$ - Воздух определяется соотношением:

$$S = \left(\frac{[CH_4]}{5} + \frac{[C_2H_2]}{2.5} + \frac{[C_4H_{10}]}{1.9} \right) = 1, \quad (5)$$

в котором учтено, что $L_{C_4H_{10}} = 1.9\%$ [6, 8]. В прямоугольной системе координат, по осям которой отложены концентрации горючих компонентов смеси – $[CH_4]$, $[C_2H_2]$, $[C_4H_{10}]$ уравнение (5) определяет плоскость, отсекающую на осях отрезки, равные нижним НКПР указанных отдельных горючих в воздухе: 5.0 %, 2.5 % и 1.9 % соответственно.

Если правило А. Ле-Шателье для указанной трехкомпонентной по горючим составляющим смеси с воздухом выполняется, то точки над этой плоскостью соответствуют области распространения пламени, а под ней - области затухания.

В Таблице № 3 представлены результаты экспериментальных исследований НКПР тройных (по горючим компонентам) смесей метана, ацетилена и бутана в воздухе.

Во всех опытах из Таблицы № 3, проведенных с составами, для которых значение суммы А. Ле-Шателье S из формулы (5) превышало единицу, как это и предсказывается правилом А. Ле-Шателье, наблюдалось распространение пламени после инициирования горения.

В опытах проведенных с составами горючих, для которых $S \leq 1$, пламя не распространялось. Предельная сумма А. Ле-Шателье – $\bar{S}$ и НКПР смеси $CH_4 - C_2H_2 - C_4H_{10}$ - Воздух при пошаговом изменении в опытах концентрации бутана (при сохранении концентраций прочих компонентов) рассчитывались по соотношениям, аналогичным формулам (3) и (4). Значения величин $\bar{S}$ и S из формулы (5) приведены в соответствующих столбцах Таблицы № 3.

Из $\bar{S}$ - столбца видно, что значения предельной суммы А. Ле-Шателье – $\bar{S}$ для исследованных в данной работе составов лежат в пределах (0.99 – 1.115) то есть вблизи единицы - значения, предсказываемого правилом А. Ле-Шателье.

Таблица № 3 - Опыты по определению НКПР смеси $CH_4-C_2H_2-C_4H_{10}$ -воздух

N п/п	Состав смеси, % объемные			S	$\bar{S}$	Факт. восп.
	CH_4	C_2H_2	C_4H_{10}			
1	0	2.2	0.25	1.02		+
2	1.0	2.0	0.0	1.0	1.033	-
3	1.0	2.0	0.125	1.066		+
4	1.0	2.0	0.3	1.158		+
5	1.0	2.0	0.5	1.263		+
6	2.0	1.8	0.0	1.12		+
7	2.0	1.8	0.125	1.19		+
8	2.0	1.8	0.4	1.33		+
9	3.0	1.0	0	1.0	1.033	-
10	3.0	1.0	0.125	1.066		+
11	3.0	1.0	0.25	1.13		+
12	3.0	1.0	1.0	1.526		+
13	4.0	0.3	0.0	0.92	0.99	-
14	4.0	0.3	0.25	1.05		+
15	4.0	0.6	0.0	1.04		+
16	4.0	0.6	0.2	1.1		+
17	4.0	0.6	1.1	1.62		+
18	5.0	0.2	0.0	1.08	1.12	-
19	5.0	0.2	0.125	1.15		+

Заключение

В результате проведенного исследования определены нижние концентрационные пределы распространения пламени для бинарных топлив метан-водород, метан-ацетилен, и трехкомпонентного топлива метан-ацетилен-бутан при изменении концентраций компонентов в пределах:

$$0 < [\text{CH}_4] \% < 5.0;$$

$$0 < [\text{H}_2] \% < 4.0;$$

$$0 < [\text{C}_2\text{H}_2] \% < 2.2;$$

$$0 < [\text{C}_4\text{H}_{10}] \% < 1.1.$$

Полученные в работе значения нижних концентрационных пределов распространения пламени в исследованных составах отличались от значений, предсказываемых правилом А. Ле-Шателье, в пределах 16 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 14-11-00773).

Литература

1. Николин В.И., Лысков Б.А., Ярембаш И.Ф. Газоносность пород больших глубин. - "Донбасс". Донецк. - 1969. 145 с.
2. Coward H.F., Jones G.W. Limits of flammability of gases and vapors. - Bulletin 503. Bureau of Mines. USA. Washington. - 1952. 83 с.
3. Zabetakis M.G. Flammability characteristics of combustible gases and vapors. - Bulletin 627. Bureau of Mines. USA. Washington. 1965. 85 с.
4. Бурчаков А.С., Мустель П.И., Ушаков К.З. Рудничная аэрология. М.: «Недра». - 1971. 205 с.
5. Газоносность угольных бассейнов и месторождений СССР. Том 1. Угольные бассейны и месторождения европейской части СССР. М.: «Недра». - 1979. 628 с.
6. Розловский А.И. Научные основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами. Москва. Химия. - 1972. 365 с.
7. У. Бейкер, П. Кокс, П. Уэстайн, Дж. Кулеш, Р. Стрелу. Взрывные явления. Оценка и последствия. Книга 1. Перевод с английского. Под ред. Я.Б. Зельдовича, Б.Е. Гельфанда. - Москва, Мир. - 1986. 208 с.
8. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. Москва, Мир, - 1968. 592.
9. Гельфанд Б.Е., Сильников М.В. Газовые взрывы. СПб. Изд-во Астерион. - 2007. 240 с.
10. Краткий справочник химика, составитель Перельман В.И., Москва, Государственное научно-техническое издательство химической литературы. - 1963. 230 с.
11. Le Chatelier H., Boudouard O. Sur les limites d'inflammabilité des melanges gazeux // Bulletin de la Societe chimique de France. Paris. - 1898. - (19). - P. 483-488.
12. Le Chatelier H., Boudouard O. Sur les limites d'inflammabilité de l'oxyde de carbone // Comptes Rendus. Paris. - 1898. - (126). - P. 1344-1347.
13. Coward H.F., Carpenter C.W., Payman W. I. The Dilution Limits of Inflammability of Gaseous Mixtures. Part III. The Lower Limits of some Mixed Inflammable Gases with Air. Part IV. The Upper Limits of some Gases, Singly and Mixed, in Air // Journ. Chem. Soc. - 1919. - (115). - P. 27-36.
14. Клебанов Ф.С., Лагутин В.И., Шаталов В.С. Определение взрывчатости горючих газов в аварийных пожарных зонах угольных шахт // Горный вестник. Кемерово. - 1994. - №2. - С. 37-41.
15. Стефанюк Б.М., Сенкус В.В., Лукин К.Д. Коэффициент взрывобезопасности угольной шахты // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: МГГУ. - 2008. - № 10. - С. 23 - 27.
16. White A.G. VIII. Limits for Propagation of Flame in Inflammable Gas-Air Mixtures. Part II. Mixtures of More than One Gas and Air // Journ. Chem. Soc. - 1925. - (127). - P. 48-61.
17. Гельфанд Б.Е., Сильников М.В., Медведев, С.П., Хомик С.В. Термогазодинамика горения и взрыва водорода. - СПб.: Изд-во Политехнического университета. - 2009. 584 с.
18. Иванов Б.А. Физика взрыва ацетилена. -М.: Химия, 1969. - 207 с.
19. В. А. Левин, Смехов, А. Н. Хмелевский. Моделирование равновесного сгорания керосина смесью газообразных углеводородов // Физика горения и взрыва. - 2007. - №4 (43). - С. 3-7.
20. В. А. Левин, Н. Е. Афонина, В. Г. Громов, Г. Д. Смехов, А. Н. Хмелевский, В. В. Марков. Газодинамика и тяга выходного устройства реактивного двигателя с кольцевым соплом // Физика горения и взрыва. -2012. - №4 (48). - С. 38-50.

21. Левин В.А., Афонина Н.Е., Громов В.Г., Смахов Г.Д., Хмелевский А.Н., Марков В.В. Исследование кольцевого сопла на про-

дуктах сгорания углеводородных топлив // Теплофизика и аэромеханика. - 2013. - № 3 (20). - С. 269-273.

КОМІРСУТЕКТІ ҚОСПАЛАРМЕН МЕТАН-АУА ҚОСПАСЫНЫҢ ЖАЛЫН ШЕКТІ ШОҒЫРЛАНУ

В.А.Левин¹, Н.Е.Афонина¹, В.Г.Громов¹, И.С.Мануйлович¹,
В.В.Марков², Г.Д.Смахов¹, А.Н.Хмелевский¹

¹Механика институты, Мәскеу мемлекеттік университеті. М.В. Ломоносов атындағы Мәскеу мемлекеттік университеті, 119192 Мәскеу қаласы, Мичурин даңғылы 1, Ресей

²Математикалық атындағы институты, В.А. Стеклова академиясы, 119991 Мәскеу, 8 көшесі Губкин, Ресей

Дерексіз

Қоспаның жанғыш компоненттерін концентрациясына сыни жақын режимдерінде сутегі қоспалардың, ацетилен және бутан осы метан-ШОБ жағу жағдайларын эксперименттік зерттеу деректер. Эксперименттік зерттеулер тұтану және жану 286 мм ішкі диаметрі, тот баспайтын болаттан сым-сфералық жану камерасы болды. Қоспаның жанғыш компоненттерін концентрациясына сыни жақын режимдерінде сутегі қоспалардың, ацетилен және бутан осы метан-ШОБ жағу жағдайларын эксперименттік зерттеу деректер. Эксперименттік зерттеулер тұтану және жану 286 мм ішкі диаметрі, тот баспайтын болаттан сым-сфералық жану камерасы болды. Барлық эксперименттер бастапқы атмосфералық қысым, бөлме температурасында және қалыпты-ылғалдылық бұрау жүргізілді. Эксперимент, біз өткізгіш-көп емес 0,07% азот қоспалардың қарағанда, құрамында жоғары тазалығы метан (99,93%) пайдаланылады. Жану сала жарылыс сым нихрома орталығы кезде конденсатор банк разряд қозғалды. разряд ignitrons шектеулер арқылы басқарылады. Батарея қуатын қажет болған жағдайда 0,1-ден 100 дейін J түрлі болуы мүмкін. Негізгі өлшенген параметр жану камерасы сфералық жалынның таралу процесінде кірген қысым болып табылады. Мынадай параметрлер бойынша бақыланатын әр тестке, ∴ конденсатор банкте сақталған энергиясын мәні кезінде, разряд қоспасының жану бастамашы; ағымдағы импульс пішіні мен ұзақтығы, Rogowski катушкалар сигнал жазу үшін жарылыс Нихром сым тудыратын; жану өнімдерінің аяқталғаннан кейін Конституциялық сотқа салқындатылған қысым. Зерттеу төменгі концентрациясы жалын-екілік-отынның, метан, сутегі, метан, ацетилен, және үш-топ-LIVA метан, ацетилен, бутан насихаттау шектейді анықталған. диапазонында компоненттердің концентрациясы өзгерген кезде: $0 < [CH_4]\% < 5,0$; $0 < [H_2]\% < 4,0$; $0 < [C_2H_2]\% < 2,2$; $0 < [C_4H_{10}]\% < 1,1$. Тест құрамдармен төменгі тұтану шегі құнының нәтижесінде 16% диапазонында, A. Le Chatelier үстемдігін болжаған мәндерден түрлі болды. Зерттеу нәтижелері көпкомпонентті өнеркәсіптік және шахта шаң мен газ қоспаларындағы Соққы толқын және дүмпу толқындардың таралу бастапқы жобалық үлгілерін тексеру және оңтайландыру үшін, жанғыш қоспалары жұмыс істеу кезінде жарылыс жағдайларын бағалау үшін пайдалануға болады.

Түйінді сөздер: метан-ауа қоспасы, көмірсутекті қоспалар, концентрациясы шекті, әдетте A. Le Chatelier.

CONCENTRATION LIMIT OF FLAME IN THE METHANE-AIR MIXTURE WITH A HYDROCARBON ADDITIONS

V.A.Levin¹, N.E.Afonina¹, I.S.Manuylovich¹, V.G.Gromov¹,
V.V.Markov², G.D.Smekhov¹, A.N.Khmelevsky¹

¹Institute of mechanics of the Moscow State University, 119192, Moscow, Michurinsky ave. 1, Russia

²Steklov Mathematical Institute, Russian Academy of Sciences, 119991, Moscow, Gudkin st. 8, Russia

Annotation

The data of experimental study of the conditions of burning methane-sme this with hydrogen additives, acetylene and butane in modes close to critical on concentrations of combustible components of the mixture. Experimental studies ignition and burning were wire-spherical combustion chamber in stainless steel, having an inner diameter of 286 mm. All experiments were performed at the initial atmospheric pressure, room temperature and normal-humidity tion. In the experiments, we used high-purity methane (99.93%), containing con-

ductive-no more than 0.07% nitrogen impurities. Combustion was initiated in the center of the sphere explosion wire Nichrome when the capacitor bank discharge. discharge is controlled by ignitrons arrester. battery power if necessary can vary from 0.1 to 100 J. The main measured parameter is the pressure that is logged in the process of distribution of a flame in the combustion chamber spherical. During each test, controlled by the following parameters:: the value of the energy stored in the capacitor bank, the discharge of which initiated the combustion of the mixture; the shape and duration of the current pulse, causing an explosion Ni-chrome wire for recording a signal with the Rogowski coil; the pressure in the cooled to the Constitutional Court after the completion of combustion products. The study identified lower flammability limits for binary-fuels, methane, hydrogen, methane, acetylene, and three-component-of fuel, methane, acetylene, butane. when changing the concentrations of the components in the range: $0 < [\text{CH}_4]\% < 5.0$; $0 < [\text{H}_2]\% < 4.0$; $0 < [\text{C}_2\text{H}_2]\% < 2.2$; $0 < [\text{C}_4\text{H}_{10}]\% < 1.1$. Resulting in the value of the lower flammability limit in the test formulations were different from the values predicted by the rule of A. Le Chatelier, in the range of 16%. The results can be used for assessment of conditions explosion when working with combustible mixtures of these, and for verification and optimization process computational models original propagation explosive detonation waves and waves in multicomponent industrial and mine dust and gas mixtures.

Keywords: methane-air mixture, hydrocarbon additives, pre-concentration cases usually A. Le Chatelier.