

**ДЛИНА ФАКЕЛА ПЛАМЕНИ ПРИ ГОРЕНИИ ЧАСТИЧНО-ПОДГОТОВЛЕННЫХ ГОРЮЧИХ СМЕСЕЙ ВОДЯНОГО ГАЗА С ВОЗДУХОМ**

Н. Н. НОРКИН

(Представлено проф. докт. техн. наук И. В. Геблером)

С помощью атмосферных горелок осуществляется горение частично-подготовленных горючих газовых смесей; смесеобразование происходит в горелке путем инжекции газом первичного воздуха, обычно в количестве, меньшем теоретически необходимого, то есть при коэффициенте избытка воздуха, меньшем единицы (отсюда и название „частично-подготовленная“ горючая смесь). Часто атмосферные горелки работают как двухпроводные с принудительной подачей газа и воздуха.

При сжигании горючих газовых смесей, содержащих первичный воздух в недостаточном для полного горения количестве, образуется двухконусный факел с двумя фронтами горения. На поверхности внутреннего конуса—внутреннего фронта—сгорает газ в количестве, эквивалентном содержанию первичного воздуха в горючей смеси. Кислород первичного воздуха вступает полностью в реакцию горения. Внутренний фронт горения является кинетической частью факела.

На поверхности внешнего конуса—внешнего фронта—сгорает оставшая часть газа с воздухом (вторичным), диффундирующим из окружающей среды. Внешний фронт горения является диффузионной частью факела.

Такое сложное кинетическо-диффузионное горение мы называем факельным горением в частично-подготовленных горючих смесях. На геометрические размеры факела влияют: диаметр горелки, скорость и режим истечения, состав горючих смесей.

Наше исследование, выполненное в лаборатории Томского политехнического института и проверенное на одном из заводов, представляет собой попытку установить некоторые обобщенные зависимости кинетическо-диффузионного факела, исходя из основных положений гидродинамической и химической кинетики путем непосредственного изучения горящего факела. Опыты производились с горелками диаметром 1,18—1,54—2,9—3,7 мм. Для сжигания применялся водяной генераторный газ состава:  $\text{CO}_2$ —4,5%,  $\text{O}_2$ —0,4%,  $\text{CO}$ —28,4%,  $\text{H}_2$ —51,0%,  $\text{CH}_4$ —6,6%,  $\text{N}_2$ —7,1% и  $\text{H}_2\text{O}$ —2,0%. Теоретически необходимое количество воздуха равно  $2,5 \text{ м}^3/\text{м}^3$ . Состав горючих смесей изменялся в пределах от 15,8 до 73,2% водяного газа в горючих смесях, то есть в пределах коэффициента избытка воздуха от  $\alpha = 2,13$  до  $\alpha = 0,14$ .

Скорости истечения горючих смесей изменялись от 1,58 до 123,3 м/сек. Числа  $Re$  изменялись от 738 до 9260.

Расход газа и воздуха измерялся газометрами. Длина факела измерялась оптическим прибором по типу катетометра. Состав горючих смесей определялся газоанализатором с дожиганием.

Результаты измерений представлены в таблице. В таблице приняты следующие обозначения:

$\alpha$  — коэффициент избытка воздуха;

$w$  — скорость истечения горючей смеси из горелки;

$l$  — длина внутреннего (кинетического) факела;

$L$  — полная длина кинетическо-диффузионного факела;

$Re = \frac{w d}{\mu} \rho$  вычислено для горючей смеси при истечении из горелки;

$u$  — скорость распространения пламени;

$\frac{w}{u} = Mi$  — критерий Михельсона (название предложено автором статьи).

Как видно из таблицы, отношение  $\frac{w}{u}$  изменялось в опытах от 3,4 до 70,5. В пределах этих отношений горение является устойчивым. Попытки получить устойчивое горение при уменьшении этого отношения кончались проскоком пламени в горелку, а при увеличении  $\frac{w}{u} > 70,5$  — отрывом факела от горелки.

Таблица

Длина факела пламени водяного газа в зависимости от состава горючих смесей, скорости истечения и диаметра горелок

$\alpha$	$w$ м/сек	$l$ мм	$L$ мм	$Re$	$u$ м/сек	$\frac{w}{u} = Mi$
1	2	3	3	4	5	6

Горелка диаметром 1,18 мм

2,13	44,1	40	40	3380	0,66	67,2
1,30	122,7	32	32	9260	2,27	54,3
0,73	85,9	24	47	6600	2,12	40,6
0,71	87,3	25	48	6700	2,07	42,2
0,67	89,1	25	52	6850	2,11	42,2
0,61	78,2	24	48	6000	1,93	40,5
0,56	85,0	25	50	6540	2,02	42,2
0,55	89,2	25	54	6850	2,11	42,3
0,51	88,2	28	56	6780	1,90	46,4
0,49	66,4	27	46	5100	1,65	40,0
0,44	95,5	29	59	7320	1,95	49,0
0,30	72,7	31	58	5600	1,40	52,0
0,25	92,0	35	72	7080	1,56	59,0
0,22	88,3	35	69	6780	1,50	59,0
0,17	90,0	39	80	6950	1,38	65,0

Горелка диаметром 1,54 мм

0,54	48,3	51	51	4060	0,73	66,0
0,5	50,4	45	45	4250	0,87	58,0
1,33	51,5	38	38	4330	1,04	49,6
1,06	51,0	31	31	4280	1,26	40,5
0,84	48,8	24	49	4100	1,55	31,1
0,63	52,6	24	53	4420	1,68	31,2
0,57	48,8	25	59	4500	1,50	32,4
0,52	59,5	26	62	5000	1,76	33,7
0,45	61,7	27	65	5650	1,76	35,0
0,36	50,2	37	84	4230	1,04	48,1
0,26	52,0	42	92	4400	0,95	54,4
0,23	46,6	47	100	3940	0,76	60,9
0,18	39,7	54	110	3320	0,57	70,0
0,16	29,0	54	91	2440	0,41	70,5

Горелка диаметром 2,9 мм

1,31	14,9	40	40	2720	0,54	27,6
1,16	14,9	40	40	2720	0,54	27,6
1,06	16,6	28	28	3040	0,85	19,3
0,90	17,2	25	70	3140	0,99	17,4
0,85	17,2	23	65	3120	1,09	15,8
0,78	17,1	22	62	3120	1,13	15,1
0,54	22,4	25	71	4100	1,30	17,2
0,48	20,9	27	80	3820	1,12	18,6
0,35	24,2	34	105	4400	1,03	23,4

Горелка диаметром 3,7 мм

1,75	8,0	25	25	1600	0,60	13,5
1,41	8,5	24	24	1700	0,65	13,0
1,02	9,6	17	17	1930	1,04	9,26
0,90	9,7	16	54	1950	1,09	8,90
0,80	10,3	15	52	2060	1,25	8,30
0,72	12,0	16	58	2400	1,38	8,7
0,62	11,2	15	54	2240	1,41	8,0
0,48	13,5	18	66	2700	1,39	9,7
0,41	13,5	25	88	2700	1,00	13,5
0,34	10,6	25	90	2120	0,77	13,8
0,29	13,2	35	127	2640	0,69	19,1
0,21	7,8	50	185	1560	0,29	27,0
0,18	7,9	54	195	1600	0,27	29,5
0,14	5,4	50	190	1080	0,19	28,5

На рис. 1 изображена прямая с экспериментальными точками на ней, показывающая зависимость относительной длины кинетической части факела от критерия Михельсона

$$\frac{l}{r} = \varphi\left(\frac{w}{u}\right) \quad (1)$$

для четырех горелок.

Таким образом, для горелок различного диаметра длина внутреннего (кинетического) конуса

$$l = r \frac{w}{u}, \quad (2)$$

что соответствует уравнению Михельсона

$$l = r \sqrt{\frac{w^2}{u^2} - 1}, \quad (3)$$

если отбросить единицу, что вполне допустимо, так как в наших опытах  $\left(\frac{w}{u}\right)^2$  изменялось от 36 до 4900.

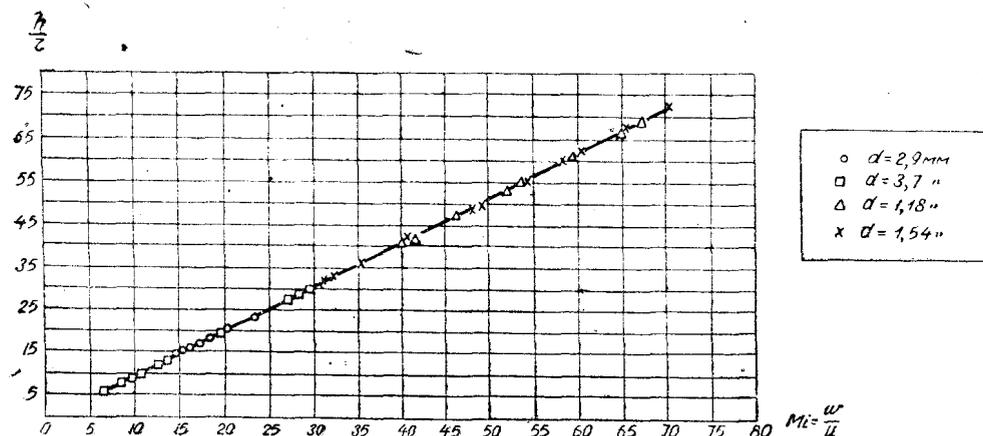


Рис. 1. Зависимость относительной длины кинетической части факела от критерия Михельсона.

Критерий  $Mi$  является мерой соотношения химической и гидродинамической кинетики в факельном процессе горения. Критерий  $Mi$  характеризует устойчивость факельного процесса, при  $Mi \leq 1$  факельный процесс неустойчив, не стабилизируется. Критическое значение

$$Mi_{крит} = 1.$$

Если при обычном факельном горении устойчивость процесса определяется значением  $Mi > 1$  (например, в наших опытах при  $Mi \geq 3,4$ ), то при гомогенно-гетерогенном горении на раскаленной поверхности (тонкие каналы, зернистый слой, пористые тела) возможен устойчивый процесс горения при  $Mi = 1$ .

Верхний предел устойчивости процесса факельного горения в опытах с водяным газом равен  $Mi = 70,5$ .

Относительная длина кинетического факела однозначное определяется критерием  $Mi$ . В случае сложного кинетико-диффузионного горения общая длина факела (внешний фронт горения) зависит главным образом от критерия  $Mi$ .

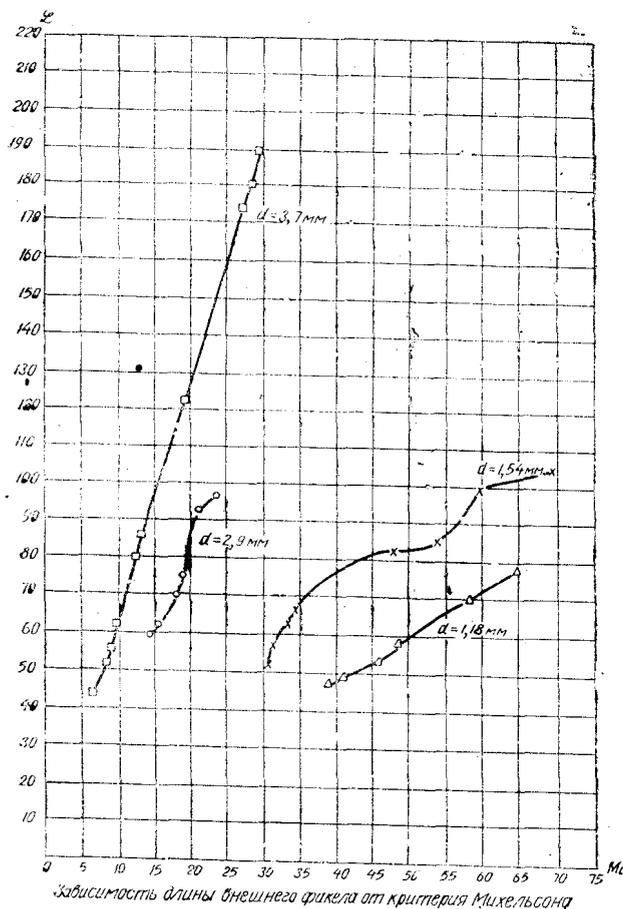


Рис. 2. Зависимость длины внешнего факела от критерия Михельсона.

На рис. 2 изображены кривые, показывающие зависимость полной длины факела  $L$  от критерия  $Mi$ . Как видно из кривых,  $L$  однозначно не определяется величиной  $Mi$ , но зависит также и от диаметра горелки.

Предположим эту зависимость в виде

$$L = A d^n Mi. \quad (4)$$

Здесь  $L$  — мм,  $d$  — мм.

Путем обработки опытных данных для горелок диаметром 2,9 мм и 3,7 мм установлено, что  $A = \text{const} = 0,535$ ,  $n = \text{const} = 1,9$ .

Обращает внимание тот факт, что истечение из этих горелок происходило преимущественно в условно ламинарном режиме при  $Re < 2320$ . Истечение из горелок диаметром 1,18 мм и 1,54 мм, происходило в условно турбулентном режиме. Для этих случаев необходимо ввести поправочный множитель

$$m = \sqrt{\frac{Re}{2320}}. \quad (5)$$

Таким образом, обобщенное уравнение зависимости полной длины кинетическо-диффузионного факела имеет вид

$$L = A m d^n Mi, \quad (6)$$

где для ламинарного режима

$$m = 1$$

и для турбулентного режима

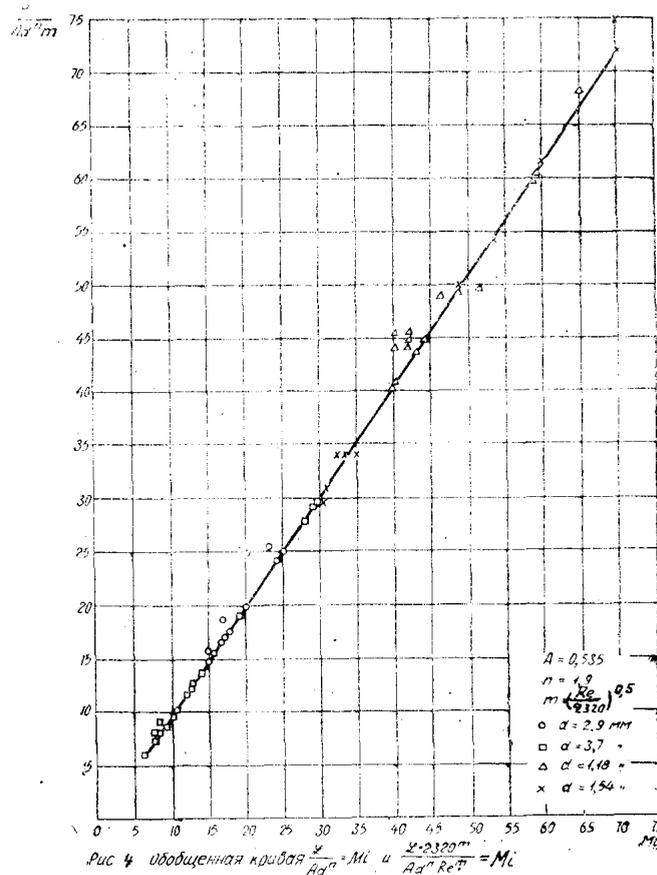


Рис. 3. Обобщенная кривая.  $\frac{L}{A d^n} = Mi$  и  $\frac{L \cdot 2320^m}{A d^n Re^m} = Mi$

$$m = \left( \frac{Re}{2320} \right)^{0,5} \quad (7)$$

Обобщенная прямая, описываемая уравнением, изображена на рис. 3.

Мы называем „условно ламинарный“ и „условно турбулентный“ режим истечения, желая этим подчеркнуть, что для горячей струи критическое значение  $Re$ , вычисленное для потока в трубе, является условным.

### Выводы

В факеле пламени, образующем два фронта горения, длина (высота) внутреннего кинетического фронта горения рассчитывается по уравнению Михельсона. Для расчета полной длины (высоты) факела с внешним фронтом диффузионного горения предложено новое уравнение, отражающее влияние характера движения, критерия Михельсона и диаметра горелки. Уравнение проверено при сжигании горючих смесей водяного газа с воздухом.

---