
LÜHIUURIMUSI * КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

А. КИНК

**ДЛИНА ТУРБУЛЕНТНОГО ДИФфуЗИОННОГО ГАЗОВОГО
ФАКЕЛА, РАЗВИВАЮЩЕГОСЯ В ПОПЕРЕЧНОМ ПОТОКЕ
И В НЕПОДВИЖНОЙ СРЕДЕ**

A. KINK. TURBULENTSE DIFUSIOONILISE GAASILEEGI PIKKUS RISTVOOLUSES JA
LIIKUMATUS KESKKONNAS

A. KINK. DIE LÄNGE EINER TURBULENTEN DIFFUSIONSFLAMME IM QUERSTROM UND
IN DER UNBEWEGLICHEN UMGEBUNG

Различные физико-химические свойства сжигаемых топлив обуславливают применение разных конструкций горелок. Однако большинство газогорелочных устройств основано на струйном принципе образования смеси с последующим сжиганием топлива в струях. Горение топлив в струе находит применение в самых различных областях техники — в ракетном деле, в двигателях внутреннего сгорания, в промышленных установках и т. д. Изучение закономерностей развития диффузионного факела позволяет развить методы расчета газогорелочных устройств. В первую очередь необходимо установить закономерности, определяющие длину факела, а также траекторию, границы и дальность факела, развивающегося в различных условиях [1-2], так как интенсивность процессов тепло- и массообмена и стойкость печей в большой мере определяется названными характеристиками факела.

По сравнению с диффузионным факелом в неподвижной воздушной среде, перемешивание факела в поперечном потоке значительно интенсифицируется. Это происходит благодаря интенсивному подводу воздуха к факелу со всех сторон, в особенности к тепловой части факела, за счет действия порных вихрей, образующих вихревой след за факелом. При этом возможно возникновение дополнительного циркуляционного движения в самом факеле.

Введем следующие обозначения:

u_0, ρ_0, d_0 — средняя скорость, плотность и диаметр струи в начальном сечении; ρ_m — плотность продуктов сгорания для стехиометрического количества воздуха при теоретической температуре горения (для практических расчетов различных газов можно принимать $\rho_m = 0,15 \text{ кг/м}^3$); W_n, ρ_n — скорость и плотность поперечного потока; ρ_n — плотность окружающего воздуха; n_{2u} — коэффициент неравномерности скорости потока в устье сопла (для конических сопел можно принимать равным 1,0, а для цилиндрических сопел или труб с необработанной внутренней поверхностью — 0,7); g — ускорение свободного падения; q_{12} — гидродинамический параметр, определяющий струи в потоке воздуха; Ag_{ϕ} — критерий Архимеда для факела; $G_{\text{стех}}$ — стехиометрический расход воздуха.

Численные значения относительной длины факела (L_{Φ}) в зависимости от параметра A и от критерия Архимеда (Ag_{Φ}) при отсутствии поперечного воздушного потока

Ag_{Φ}	A	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
0,000 000 5	9,99	19,99	29,99	39,99	49,99	59,98	69,96	79,99	89,90	99,85	109,78	119,69	129,58	139,43	149,26	197,71	289,47	371,45	442,49	503,56	556,32	602,43	643,23	679,75	
0,000 000 75	9,99	19,99	29,99	39,99	49,98	59,97	69,95	79,91	89,85	99,78	109,67	119,54	129,37	139,16	148,89	196,64	285,13	361,56	425,94	480,28	526,76	567,17	602,84	634,75	
0,000 001	9,99	19,99	29,99	39,99	49,98	59,96	69,93	79,88	89,80	99,70	109,57	119,42	129,16	138,89	148,54	195,61	281,23	353,27	417,85	462,61	504,96	541,69	574,10	603,10	
0,000 0025	9,99	19,99	29,99	39,98	49,95	59,90	69,82	79,70	89,52	99,27	109,04	118,52	127,99	137,33	146,54	190,19	263,72	330,68	392,76	442,72	483,98	519,07	548,00	566,48	
0,000 005	9,99	19,99	29,98	39,96	49,91	59,81	69,65	79,40	89,06	98,58	107,96	117,17	126,20	135,02	143,62	183,13	245,51	291,58	337,48	376,83	411,68	443,27	472,42	499,64	
0,000 0075	9,99	19,99	29,98	39,94	49,86	59,71	69,46	79,12	88,61	97,93	107,04	115,94	124,58	132,97	141,09	177,61	233,32	273,71	309,64	339,75	362,52	371,49	388,33	403,51	
0,000 01	9,99	19,99	29,97	39,92	49,82	59,62	69,31	78,84	88,10	97,31	106,19	114,79	123,11	131,13	138,85	173,08	224,20	260,93	289,44	312,80	332,65	349,97	379,27		
0,000 025	9,99	19,98	29,94	39,81	49,55	59,05	68,36	77,32	85,91	94,11	101,91	109,23	116,29	122,89	129,14	155,80	193,93	221,02	242,15	259,56	274,45	287,51	299,17	309,74	
0,000 05	9,99	19,97	29,88	39,63	49,13	58,27	66,99	75,20	82,91	90,11	96,82	103,07	108,90	114,35	119,46	140,89	171,19	192,79	209,74	223,79	235,85	246,47	255,98	264,61	
0,000 75	9,99	19,95	29,82	39,45	48,73	57,53	65,79	73,45	80,53	87,07	93,10	98,67	103,81	108,65	113,14	131,90	158,39	177,36	192,30	204,73	215,42	224,85	233,31	240,99	
0,0001	9,99	19,95	29,76	39,29	48,35	56,86	64,72	71,96	78,57	84,62	90,17	95,28	100,00	104,38	108,47	125,52	149,63	166,95	180,63	192,03	201,86	210,51	218,33	225,42	
0,000 25	9,99	19,88	29,45	38,37	46,50	53,74	60,17	65,88	70,97	75,56	79,72	83,51	87,01	90,25	93,26	105,85	123,80	136,86	147,26	155,99	163,54	170,23	176,25	181,74	
0,0005	9,98	19,77	28,95	37,14	44,25	50,36	55,63	60,24	64,32	67,98	71,28	74,30	77,07	79,64	82,04	92,10	106,56	117,18	125,69	132,84	139,06	144,58	149,56	154,10	
0,00075	9,98	19,66	28,51	36,16	42,59	48,03	52,68	56,72	60,28	63,45	66,36	69,00	71,43	73,68	75,78	84,62	97,41	106,84	114,42	120,80	126,36	131,30	135,76	139,83	
0,001	9,97	19,56	28,12	35,33	41,28	46,26	50,50	54,17	57,41	60,31	62,94	65,34	67,55	69,60	71,52	79,59	91,32	100,00	106,98	112,88	118,02	122,68	126,71	130,48	
0,0025	9,95	19,02	26,37	32,06	36,58	40,27	43,40	46,11	48,50	50,65	52,60	54,39	56,04	57,58	59,02	65,12	74,08	80,77	86,19	90,77	94,78	98,35	101,58	104,53	
0,0075	9,79	17,76	23,33	27,37	30,51	33,07	35,25	37,15	38,88	40,35	41,74	43,00	44,19	45,29	46,33	50,75	57,31	62,25	66,26	69,68	72,67	75,33	77,75	79,97	
0,01	9,73	17,61	22,42	26,09	28,94	31,28	33,27	35,00	36,54	37,93	39,20	40,36	41,45	42,46	43,42	47,48	53,54	58,10	61,82	64,98	67,75	70,23	72,47	74,53	
0,025	9,41	15,58	19,39	22,10	24,21	25,95	27,45	28,75	29,92	30,97	31,94	32,83	33,67	34,44	35,18	38,32	43,02	46,59	49,51	51,99	54,17	56,12	57,89	59,51	
0,05	9,01	14,09	17,12	19,28	20,97	22,38	23,59	24,65	25,60	26,46	27,25	27,99	28,67	29,31	29,91	32,51	36,41	39,38	41,81	43,88	45,70	47,33	48,81	50,16	
0,1	8,46	12,55	14,96	16,69	18,06	19,20	20,19	21,05	21,83	22,54	23,19	23,80	24,36	24,89	25,39	27,54	30,78	33,25	35,28	37,01	38,53	39,90	41,13	42,27	
0,50	6,80	9,21	10,65	11,72	12,57	13,28	13,91	14,46	14,96	15,41	15,83	16,22	16,58	16,92	17,25	18,65	20,77	22,40	23,74	24,88	25,89	26,80	27,62	28,37	
1,0	6,03	7,95	9,13	10,00	10,70	11,29	11,80	12,25	12,67	13,05	13,40	13,72	14,02	14,31	14,58	15,74	17,52	18,88	20,00	20,96	21,81	22,56	23,25	23,88	
5,0	4,40	5,57	6,30	6,86	7,30	7,68	8,02	8,31	8,56	8,83	9,06	9,27	9,47	9,65	9,83	10,60	11,77	12,68	13,42	14,06	14,62	15,12	15,58	16,00	
10	3,79	4,75	5,35	5,81	6,18	6,50	6,78	7,02	7,25	7,45	7,64	7,82	7,99	8,14	8,29	8,93	9,92	10,67	11,30	11,83	12,30	12,73	13,11	13,11	
50	2,65	3,25	3,64	3,84	4,18	4,30	4,47	4,73	4,88	5,02	5,14	5,26	5,37	5,47	5,57	6,00	6,65	7,15	7,57	7,93	8,24	8,52	8,73	9,03	
100	2,25	2,75	3,08	3,33	3,53	3,70	3,85	3,99	4,11	4,23	4,33	4,43	4,52	4,61	4,69	5,05	5,60	6,02	6,37	6,67	6,93	7,17	7,27	7,40	

В работе [3] получена аналитическая зависимость для относительной длины факела в поперечном потоке

$$0,003 \text{ Ag}_\Phi L_\Phi^4 + 0,003 q_{12} L_\Phi^3 - 0,03 \sqrt{q_{12}} L_\Phi^2 + L_\Phi - A = 0, \quad (1)$$

где

$$A = 25 G_{\text{стех}} \sqrt{Q_0 Q_m} (Q_n d_0^{0,25} n_{2u}^{0,5})^{-1};$$

$$\text{Ag}_\Phi = \frac{g d_0}{u_0^2} \left(\frac{Q_n - Q_m}{Q_0} \right); \quad q_{12} = \frac{Q_n W_n^2}{Q_0 u_0^2}.$$

Видно, что относительную длину диффузионного факела, развивающегося в поперечном потоке, можно описать алгебраическим уравнением 4-й степени. Если поперечный воздушный поток отсутствует ($q_{12} = 0$), то уравнение (1) принимает вид

$$0,003 \text{ Ag}_\Phi L_\Phi^4 + L_\Phi - A = 0. \quad (2)$$

Решение уравнения (2) табулировано в зависимости от A и Ag_Φ (см. таблицу).

Чтобы не было недоразумений при сопоставлении расчетных и опытных данных, целесообразно показать на примере последовательность и порядок расчета длины газового факела с использованием таблицы при $q_{12} = 0$. В качестве примера приведем случай сжигания сланцевого газа в неподвижной окружающей среде.

Исходные данные: начальная температура газа — $T_0 = 293^\circ \text{K}$ ($Q_0 = 0,93 \text{ кг/м}^3$); температура окружающего воздуха — $T_n = 293^\circ \text{K}$ ($Q_n = 1,20 \text{ кг/м}^3$); цилиндрическое сопло диаметром $d_0 = 0,015 \text{ м}$; коэффициент неравномерности скоростного поля в устье сопла $n_{2u} = 0,7$; начальная скорость в устье сопла $u_0 = 15 \text{ м/сек}$.

Расчетные величины: стехиометрическое число $G_{\text{стех}} = 4,5 \text{ кг/кг}$; плотность продуктов сгорания (при $\alpha_0 = 1,0$) $Q_m = 0,15 \text{ кг/м}^3$; параметр $A = 120$; критерий Архимеда $\text{Ag}_\Phi = 0,00074$.

Из таблицы при $A = 120$ и $\text{Ag}_\Phi = 0,00074$ получаем, что относительная длина факела $L_\Phi = 69$ и действительная длина факела $L'_\Phi = L_\Phi d_0 = 1,04 \text{ м}$.

При помощи таблицы можно получить зависимость $L_\Phi = f(A, \text{Ag}_\Phi)$ для любого газа, что открывает перспективы обобщения результатов, списывающих длину факелов различных газогорелочных устройств, основанных на струйном принципе образования смеси.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кинк А., Иванов Ю., Изв. АН ЭССР, Физ. Матем., 16, 94 (1967).
2. Кинк А., Иванов Ю., Изв. АН ЭССР, Физ. Матем., 16, 200 (1967).
3. Кинк А., Характеристики круглого турбулентного диффузионного газового факела, развивающегося в неограниченном поперечном потоке и неподвижной окружающей среде. Автореф. дисс. канд. техн. н., Таллин, 1967.

Институт термодинамики и электрофизики
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
17/XI 1969